システム開発

１６－Ｆ－５

デジタルハンド技術の開発に関するフィージビリティスタディ

報告書

－　要旨　－

平成１７年３月

財団法人　機械システム振興協会

委託先　社団法人　人間生活工学研究センター

この事業は競輪の補助金を受けて実施したものです。

序

わが国経済の安定成長への推進にあたり、機械情報産業をめぐる経済的、社会的諸条件は急速な変化を見せており、社会生活における環境、都市、防災、住宅、福祉、教育等、直面する問題の解決を図るためには技術開発力の強化に加えて、多様化、高度化する社会的ニーズに適応する機械情報システムの研究開発が必要であります。

このような社会情勢の変化に対応するため、財団法人機械システム振興協会では、日本自転車振興会から機械工業振興資金の交付を受けて、経済産業省のご指導のもとにシステム技術開発調査研究事業、システム開発事業、新機械システム普及促進事業等を実施しております。

このうち、システム技術開発調査研究事業及びシステム開発事業については、当協会に総合システム調査開発委員会（委員長：放送大学副学長 中島 尚正氏）を設置し、同委員会のご指導のもとに推進しております。

本「デジタルハンド技術の開発に関するフィージビリティスタディ」は、上記事業の一環として、当協会が社団法人人間生活工学研究センターに委託し、実施した成果をまとめたもので、関係諸分野の皆様方のお役に立てれば幸いであります。

平成１７年３月

財団法人 機械システム振興協会

はじめに

機械システムの設計に CAD が利用されるようになって久しい。当初は図面を修正・再利用する道具であったものが、さまざまな CAE ツールと連携するようになり、設計図作成支援（Computer Aided Drawing）から、設計支援の道具へと発展を続けている。CAD システムをベースにして、設計段階で部品強度を仮想評価したり、システムの挙動や機能、外観を可視化したり、コンカレントエンジニアリングとして部品の製造・流通工程をオンライン管理したり、さらには、LCA として資源採取から廃棄に至るまでの製品ライフサイクル全体を見渡したりできるようになってきた。設計段階でできうる限りの機能評価・性能評価をすることで、設計－試作－評価のサイクルを低減し、製品化までの期間と工数を短縮するという「デジタルモックアップ」である。

本スタディの「デジタルハンドは」、この「デジタルモックアップ」のコンセプトに基づくものである。ただし、対象は製品そのものではない。その製品を扱う人間、特に、人間の手の構造をモデル化し、製品を操作する手の機能をコンピュータ上に再現するのが「デジタルハンド」の研究テーマである。そもそも多くの製品はそれ単体では用をなさない。自動車にせよ、デジタルカメラや携帯電話にせよ、装置だけが存在していても機能せず、それを運用する人間があってはじめて機能する製品である。だとすれば、「デジタルモックアップ」として製品単体の機能である強度や製造コストを仮想評価するだけでは不十分である。製品が人間と一体となって機能する状況そのものを、そして、その製品を使った人間側の評価（操作性、安心感、満足感）を模擬再現できなければならない。製品は人工物であり、その構造と機能が明らかになっているのに対し、人間の構造・機能は十分に解明されておらず、また、製品とは異なり大きな個人差が存在する。そこで、本スタディでは「デジタルハンド」のベースとしてもっとも重要である人間の手の骨格構造をコンピュータ上にモデル化するとともに、同一骨格構造の上に現れるサイズの個人差について実測データをもとにモデル化を行う。また、骨格構造上の変化である手の運動を精密に計測する方法を開発し、機械システムに多用される「シリンダー状つまみの把持動作」をモデル化する。スタディで得られたデータとモデルを、コンピュータ上のソフトウェアプログラムとして実装し、製品使用時の人間の構造と機能を可視化する。

デジタルハンドは単に手の骨格構造やサイズバリエーション、運動を再現し可視化するだけのものではない。把持力、筋力、摩擦、感覚や学習、技能、認知機能をモデル化し、ソフトウェアとして実装していく必要がある。本スタディで開発する「デジタルハンド」ソフトウェアは、そのための基本構造モデルを持つもので、将来、これらの機能を拡張する際のベースとなるものである。

平成１７年３月

社団法人　人間生活工学研究センター

序

はじめに

【目次】

１．本スタディの目的……1

２．フィージビリティスタディの実施体制……2
2.1　実施体制……2

３．スタディの内容……4
第１章　手指の寸法データベースの構築……4
1.1　手の三次元計測……4
1.2　手の三次元計測結果……9
1.3　まとめ……12

第２章　手の寸法代表ファミリーの合成……13
2.1　バウンダリーファミリー……13
2.2　三次元代表モデル合成……22
2.3　MR 画像からの骨形状モデル抽出……27
2.4　手の構造モデル……30
2.5　まとめ……34

第３章　デジタルハンドの試作……35
3.1　骨ポリゴンを用いたリンク構造解明……35
3.2　モーションキャプチャからのリンク構造同定・姿勢計測……40
3.3　デジタルハンドモデル……41
3.4　デジタルハンドソフトウエアの展開……47
3.5　まとめ……48

第４章　スタディの成果……49

おわりに……51

１．本スタディの目的

本スタディの目的は、手をインタフェースとする機械システムを、様々な利用者の手の特性に適合するように設計するためのデジタルハンド技術について、日本人の手指の計測を行うとともに、そのデータを活用して機械製品の把持姿勢を再現できるデジタルハンドソフトの試作を行うことである。

機械システムの多くは、ユーザインタフェースとして、手で操作するインタフェースを備えている。スイッチ、ハンドル、ボタンで操作する機器（計装機器、VTR、カーナビ、券売機など）、あるいは、手で握って使うような小型の精密機器（携帯電話、内視鏡など）である。これらの機器操作において、手の大きさに合わず使いにくい、指が届かない、指を挟んでしまった、ボタン位置を体得しにくい、グリップ感が悪いなど、様々な問題が生じている。これらの問題は、現象としては多様であるが、本質的に、設計者が利用者のバリエーションを想定できないことに起因している。「そんな大きさの手まで考えていなかった」「そんな使い方をするとは思わなかった」というものである。

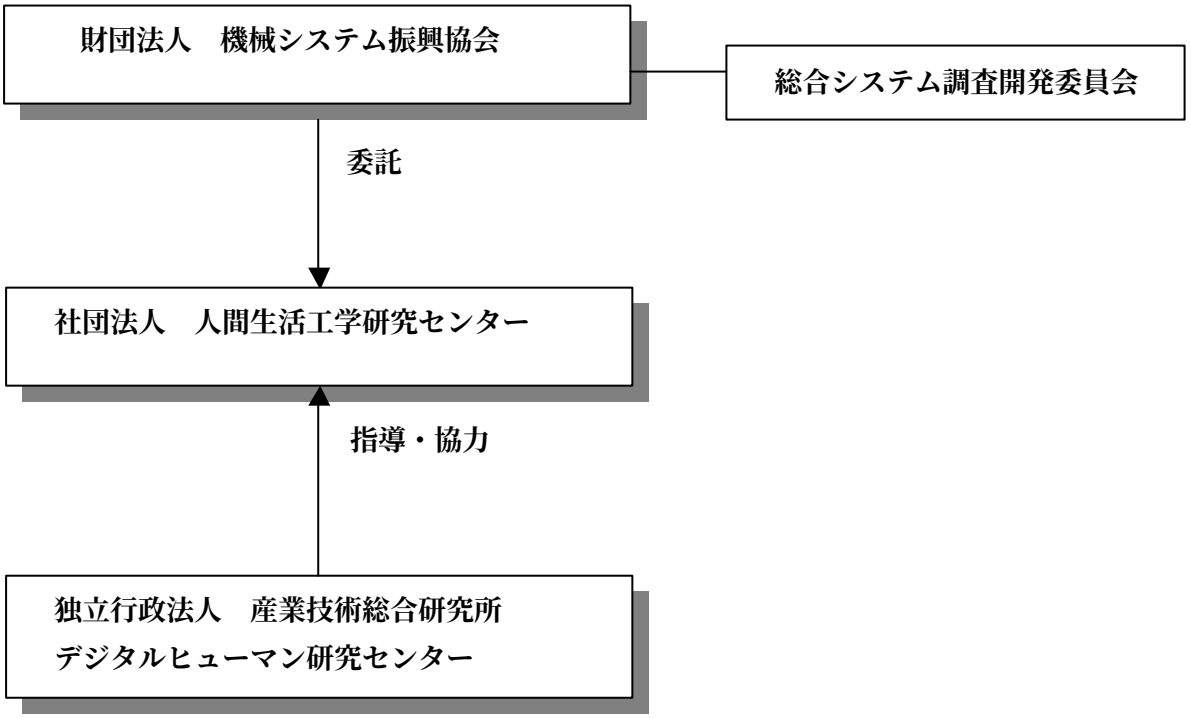
現在、これらの問題は、実際に製品を市場に出した後、利用者からのクレームに対応したマイナーチェンジを行うことで解決されている。本スタディで試作する「デジタルハンド」とは、コンピュータ上に創り出す多様な仮想ユーザの「手」がコンピュータ上に記述された機械システムに対して操作をすることにより、設計段階で機械システムの持つ潜在的な問題箇所を洗い出すための技術である。このような評価のためのコンピュータマネキンの利用分野は、全身的な寸法設計や運動生成を要求される分野に限定されており、携帯電話や内視鏡、カーナビゲーションなどには応用されていない。

本スタディの「デジタルハンド技術」は、手の機能再現に特化することで、従来、見過ごされてきた機械システム設計分野の人間適合性向上に資するものであり、デジタルハンドの試作開発を行うことにより、コンピュータ上に様々な手の大きさの再現を行い、把持姿勢の違いによる製品の外観形状の評価を行うことにより、デジタルハンド技術のキーとなる技術的ブレークスルーの確立を行うものである。デジタルハンド技術を確立することにより、①製造者は、デジタルハンド技術を適用することで、設計段階において、コンピュータ上で、製品の操作性等の評価を行うことができ、利用者個人の手の大きさや機能に適合した付加価値の高い製品・機器の製造が可能となり、産業競争力が強化される。②高齢者をはじめとする利用者が自分自身の手の大きさや機能に適合した使いやすい製品・機器を得ることができ、質の高い生活を送ることができる社会の形成に、大きな貢献が期待されている。

2．フィージビリティスタディの実施体制

2．1　実施体制

（財）機械システム振興協会内に総合システム調査開発委員会を設置し、（社）人間生活工学研究センターにおいて、フィージビリティスタディを実施し、開発方針、取得データの解析及びデジタルハンド試作については、独立行政法人　産業技術総合研究所　デジタルヒューマン研究センターの指導・協力を受け推進した。



総合システム調査開発委員会は以下の委員で構成した。

総合システム調査開発委員会委員名簿

（順不同・敬称略）

委員長	放送大学 副学長	中島尚正
委員	政策研究大学院大学 政策研究科 教授	藤正　巌
委員	東京工業大学 大学院総合理工学研究科 知能システム科学専攻 教授	廣田　薫
委員	東京大学大学院 工学系研究科 助教授	藤岡　健彦
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 コーディネータ	太田　公廣
委員	独立行政法人産業技術総合研究所 産学官連携部門 シニアリサーチャー	志村　洋文

３．スタディの内容

第１章　手指の寸法データベースの構築

手の三次元計測器を用いた、100 名（20～70 代男女各 50 名）の手の形状データを取得し、これから 27 部位の手の寸法データを求めた。

この 100 名について、性差、手計測データとの差異等の解析を行うとともに、三次元計測データに基づく、手指の寸法データベース化（平均値、標準偏差）を行った。

１．１　手の三次元計測

1.1.1　手の三次元計測器

滑動計等で直接手の寸法を計測し、寸法データを得ることが既に行われているが、将来の大規模データベースを構築する時を見据えて、短時間でかつ特殊な技能を有することなく、手の形状及び寸法が得られる三次元計測器による計測を行った。

三次元計測器は、株式会社プレックス製の p-MoAi（プレックスモアイ）を用いた。この三次元計測器は、手袋の製造に必要な寸法を抽出することを目的としているため、ISO-7250 や JIS Z8500 に定める計測項目とは、必ずしも一致していない。

計測器の外観を図１－１－１に、性能を表１－１－１に示す。斜め上方からスキャンする LD 光の照射と、固定したカメラから、高さ方向の情報を含む三次元点群データを得る。手をおいた面の下からはＬＥＤの照射を受けての輪郭がシルエットとして浮かぶようになっている。

図 1－１－１　プレックス社製の手の三次元計測器

表 1－１－１　プレックス社製の手の三次元計測器性能

商品名	立体計測装置（p-MoAi）
型式	BC-01
メーカ	株式会社プレックス
測定原理	光切断法
装置サイズ	H430×W280×D280 (mm)
カメラ台数測定サイズ	1 台（680×480pixel）
測定光源	LD
測定時間	約 20 秒（計測時間のみ）
点間ピッチ	ラインピッチ 3.5～2mm
測定精度	長さ精度 約 0.5mm
測定データ	形状＋高さ
測定点数	80 ライン
データ形式	CSV
測定環境	通常照明下（計測部は LED 照明）
安全性	―
OS（ＣＰＵ）	Windows XP（VIA C3 800MHz）
表示	タッチパネル式 10.4inch TFT LCD
重量	14kg

1.1.2　手の計測項目

今回計測を行なった、手の計測項目（27 項目）を図 1－１－２及び表１－１－２に示す。

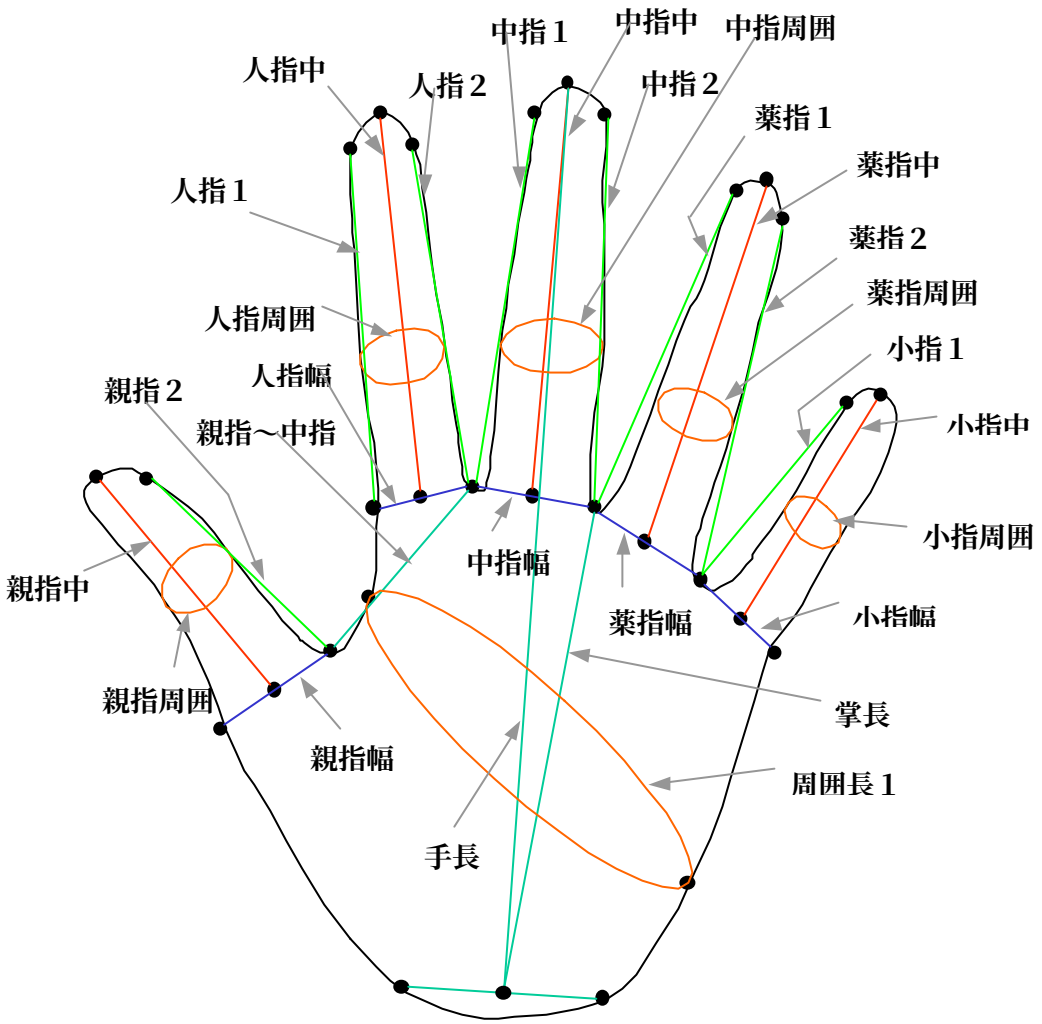


図１－１－２　三次元計測器による手の計測項目

表１－１－２　手の計測項目一覧

No	計測項目
1	手長
2	手掌長
3	周囲長
4	親指中心
5	親指２
6	親指周囲長
7	親指幅
8	人指中心
9	人指１
10	人指２
11	人指周囲長
12	人指幅
13	中指中心
14	中指１
15	中指２
16	中指周囲長
17	中指幅
18	薬指中心
19	薬指１
20	薬指２
21	薬指周囲長
22	薬指幅
23	小指中心
24	小指１
25	小指周囲長
26	小指幅
27	親指中指間隔

1.1.3　計測手順

三次元計測器による計測手順を図１－１－３に示す。

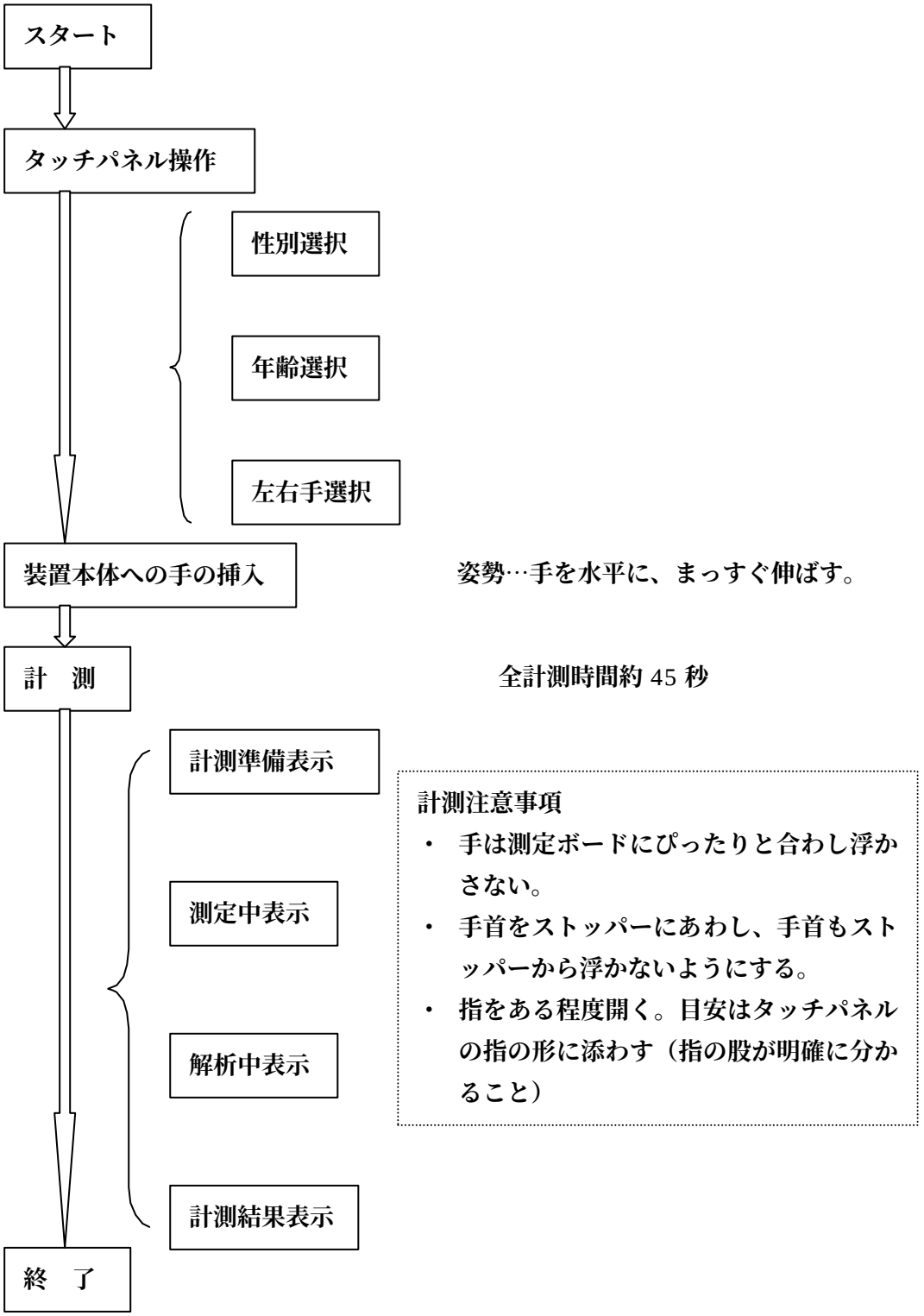


図１－１－３　三次元計測器の計測手順

1.1.4　三次元計測器による結果の表示

計測結果は４つのファイルセット（No.ori、No.raw、No.raws、No.re：No は装置ランニング番号）からなるデータとして蓄積される。これらのファイルを用いた、データ閲覧ソフトによる個々の手の表示例を図１－１－４に示す。

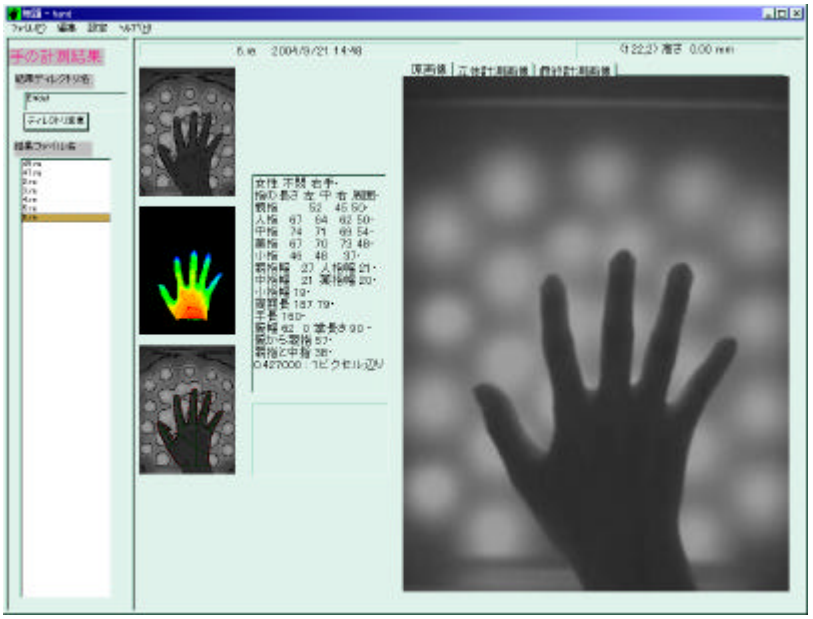


図１－１－４　データ閲覧ソフトによる計測データの表示例

表１－１－２の２７の寸法項目は自動的に計算される。

１．２　　手の三次元計測結果

男女各 50 人の合計 100 人の被験者による手の三次元計測を行なった。

1.2.1　被験者

被験者の年代を表１－２－１に示す。

表１－２－１　被験者年代

年　代	男性（人）	女性（人）
20 代	13	8
30 代	12	8
40 代	7	10
50 代	5	14
60 代	9	10
70 代	4	0
合　計	50	50

1.2.2　計測結果

右手について行った 27 計測項目の男女別及び被験者全体の平均値、標準偏差を表１－２－２に示す。

表１－２－２　三次元計測器による右手の寸法計測結果

単位：mm

No.	計測項目	男　性		女　性		全　体	
		平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
1	手長	187.6	8.6	171.2	8.4	179.4	11.8
2	手掌長	105.6	7.2	94.8	7.2	100.2	9.0
3	周囲長	228.0	10.8	205.6	10.1	216.8	15.3
4	親指中心	61.4	3.4	57.2	9.5	59.3	4.0
5	親指２	48.8	4.3	43.9	3.5	45.3	4.1
6	親指周囲長	64.4	4.2	59.6	4.1	62.0	4.8
7	親指幅	38.4	2.6	35.7	3.0	37.0	3.1
8	人指中心	75.1	3.5	69.6	2.4	72.3	4.0
9	人指１	77.9	3.6	72.2	2.5	75.0	4.2
10	人指２	71.8	3.5	66.6	2.3	69.2	3.9
11	人指周囲長	60.4	4.9	55.2	4.1	57.8	5.2
12	人指幅	28.5	1.8	23.9	1.4	25.2	2.0
13	中指中心	81.9	3.2	78.0	2.9	79.0	4.2
14	中指１	82.4	3.3	78.6	3.3	79.5	4.4
15	中指２	81.2	3.3	75.4	2.9	78.3	4.2
16	中指周囲長	62.8	4.5	56.8	4.1	59.8	5.2
17	中指幅	25.3	1.4	23.2	1.5	24.3	1.8
18	薬指中心	77.1	3.6	71.1	2.5	74.1	4.3
19	薬指１	72.5	3.8	66.6	2.8	69.5	4.4
20	薬指２	81.5	3.8	75.1	2.9	78.3	4.9
21	薬指周囲長	56.6	4.2	51.0	3.2	53.8	4.7
22	薬指幅	25.5	1.5	23.4	1.2	24.4	1.7
23	小指中心	60.3	3.9	54.8	3.7	57.6	4.7
24	小指１	57.2	3.7	51.9	3.6	54.6	4.5
25	小指周囲長	49.6	3.8	44.7	3.4	47.3	4.3
26	小指幅	23.5	1.8	21.2	1.9	22.4	2.1
27	親指中指間隔	47.5	4.0	42.1	3.3	44.8	4.6

1.2.3　手計測データとの比較

三次元計測器による寸法と別途行った手計測による「手長」「手掌長」「第 2 指長（人指指中心長）」の寸法との比較を行った。各寸法の平均値及び標準偏差を表１－２－３に、三次元計測データと手計測データとの差の平均値及び標準偏差を表１－２－４に示す。

表１－２－３　三次元計測及び手計測データの比較

単位：mm

寸　法	手長		手掌長		第２指長（人指中央）	
	三次元	手計測	三次元	手計測	三次元	手計測
男性平均	187.6	190.8	105.6	112.4	75.1	70.9
男性標準偏差	8.6	5.7	7.2	4.8	3.5	3.3
女性平均	171.2	174.2	94.8	102.0	70.0	64.7
女性標準偏差	8.4	6.9	7.2	4.9	2.4	3.0
男女平均	179.4	182.5	100.2	107.2	72.3	67.8
男女標準偏差	11.8	10.7	9.0	7.1	4.0	4.4

表１－２－４　三次元計測と手計測との差の比較（三次元計測データ－手計測データ）

単位：mm

寸　法	手長	手掌長	第２指長（人指中央）
男性平均	-3.1	-6.8	4.1
男性標準偏差	9.6	7.7	3.7
女性平均	-3.0	-7.2	4.8
女性標準偏差	8.6	8.0	3.5
男女平均	-3.1	-7.0	4.5
男女標準偏差	9.1	7.8	3.6

1.2.4　三次元計測データから任意の手寸法項目の抽出

手の三次元計測器の画像からは、27 項目の手の寸法を自動的に抽出できるようになっているが、本スタディで使用した三次元計測器は本来、手袋の製造に必要な寸法を抽出することを目的としているため、ISO-7250 や JIS Z8500 の規格や他の手に関する製品に必要な寸法については、自動的に抽出できるようになっていない。

手の三次元画像から任意の寸法を抽出するためには、図１－１－４（データ閲覧ソフトによる計測データの表示例）に示す画面を使い、画像内の任意の点をクリックし、クリッ

ク点の三次元座標（平面の X-Y 座標と、手をおいている面を基準にした高さ）が閲覧ソフト上に現れるため、２点間の投影長をピタゴラスの定理から求める。例えば指の幅は、指のしわの位置をマーキングしておけば、その点を含む横断線を書いて、両端座標が得られるため、これを入力すれば長さが計算される。しかし、座標を求める作業は、手作業であり、結構面倒なため、多人数の解析に使用するためには、自動寸法計算機能を実装しなければ実用化は難しい。

１．３　　まとめ

手の三次元計測器を用いた、100 名（20～70 代男女各 50 名）の手の形状データを取得し、これから 27 部位の手の寸法データを求めた。

この 100 名について、性差、手計測データとの差異等の解析を行うとともに、三次元計測データに基づく、手指の寸法データベース化（平均値、標準偏差）を行った。

この結果から、手の三次元計測器による手の形状データから、特定の寸法については、手計測による寸法の算出が可能なことが確認でき、手袋等の手に関係する製品に必要な手の寸法項目を求める手法を確立した。また、100 人規模の手計測による手の詳細寸法データと三次元計測器による寸法データとの比較を行うことにより、三次元計測器による短時間で、かつ特別な技能がなくても、大規模の手の寸法データベース構築が可能であることが確認できた。

第2章　手の寸法代表ファミリーの合成

100 人規模の手の詳細計測データと三次元計測データに基づく、日本人のサイズバリエーションを代表する手の寸法セット(ファミリー)を合成する。平均的な手、大きな手、がっしりした手など日本人の手のサイズのバリエーションの 95%をカバーする確率楕円上にある代表的な手のパターンの集合である。ここでは 9 体のファミリーを生成する。この寸法代表ファミリーと別途計測する MRI 画像等による手の形状及び構造データとを合成することにより、手の構造モデルを生成する。また、MRI 画像から骨形状モデルの抽出を行った。

２．１　バウンダリーファミリー

2.1.1　100 人規模の手の寸法計測データに基づくバウンダリーファミリー

手で操作する製品の設計段階における事前評価のためには、様々な大きさとプロポーションの手をコンピュータの中に再現する必要がある。人体寸法から分布の周辺にあるコンピュータマネキンの体型を再現する方法を使って、日本人の手の個人差の 95%をカバーする９体のデジタルハンドファミリーを生成する。

日本人成人 101 名（男性 68 名、女性 33 名）の被験者の右手の 82 項目（長径 21、幅径 23、厚径 14、機能寸法 1、リンク長推定のための項目 23）の詳細な計測データに基づき、バウンダリーファミリーの寸法を計算した。

図２－１－１に、リンク長の推定方法を示す。関節の近位の骨の頭部を球とみなし、球の中心を関節の回転中心と考えて計算している。

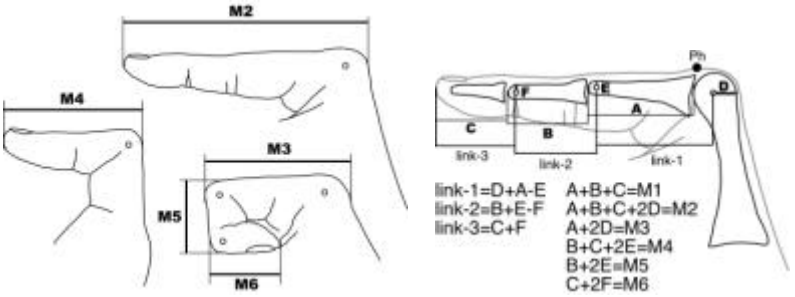


図２－１－１　指リンク長の推定方法

バウンダリーファミリーの生成は Bittner ら（1986）の方法による。n 人の被験者について計測したm個の人体寸法データを因子分析することにより、互いに相関するm個の寸法がもつ情報を、互いに無相関な 2 個の因子がもつ情報に要約する。第１因子、第２因子の得点に基づいて散布図を書き、被験者の 95%がその中に入るような確率楕円を考える。図

２－１－２の分布の中心にいるのが平均（９番）である。確率楕円の式と X 軸、Y 軸の式、その中間にある直線の式から、第１因子、第２因子の軸との交点にいる形態（1,5,3,7）、２つの軸の中間にいる形態（2,4,6,8）がもつべき因子得点を計算する。この因子得点から寸法を計算する。

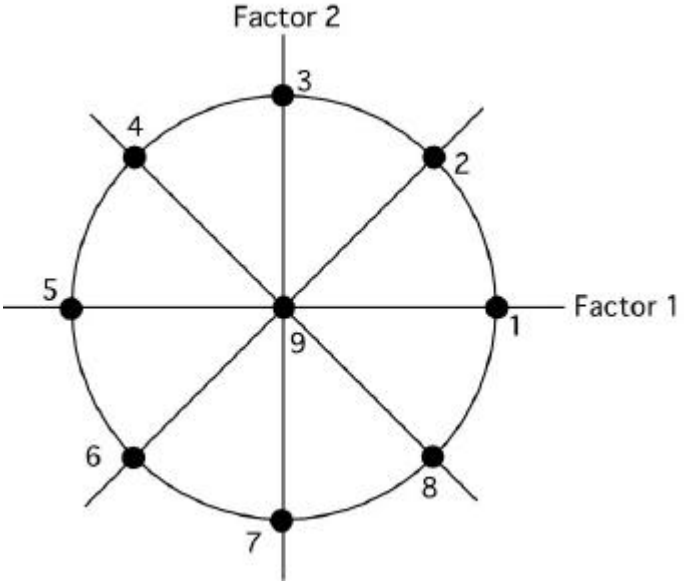


図２－１－２　バウダリーファミリー

http://www.aist.go.jp/research/awaseru/2004HandDim/

図２－１－３に因子分析に用いた 71 項目を示す。因子分析には SPSS（エス・ピー・エス・エス㈱　統計解析ソフト）を用いた。Varimax 回転後の結果を表２－１－１に示す。固有値が 1 以上の因子が 7 つあった。

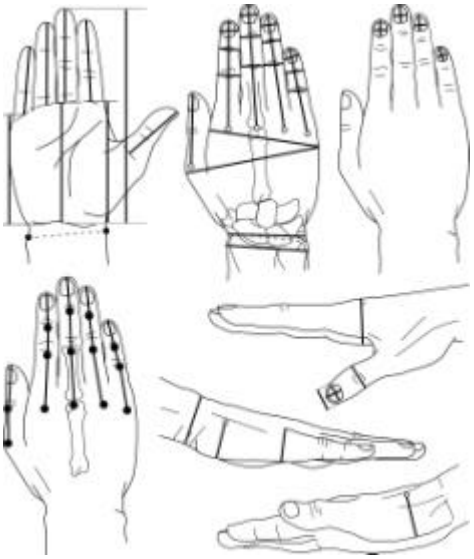


図２－１－３　因子分析に用いた寸法項目

表２－１－１　因子分析 Varimax 回転後の結果

因子		寄与率(%)	累積寄与率	因子の解釈
1	21.7	30.5	30.5	Thickness of joints
2	19.2	27.0	57.5	Length of finger bones
3	5.8	8.2	65.7	Length from nail base to finger tip
4	4.7	6.7	72.4	Nail breadth
5	3.2	4.4	76.8	Breadth of finger tip
6	2.1	2.9	79.7	Length of distal link of fingers
7	1.5	2.1	81.9	Palm length

第 1 因子は関節の太さに、第２因子は指の長さに関する因子であり、この 2 因子で全分散の 58%を説明する。第 3～7 因子の多くは指先に関するもので、各因子の説明する分散の割合も大きくない。第 1、2 因子で形態個人差の概要を表現できると思われる。

図２－１－４に第 1、第 2 因子の得点に基づく被験者の散布図を示す。両因子ともに有意な性差があった。すなわち、男性の手の方が関節が太く、指が長かった。しかし、手で操作する機器の大部分は男女共用なので、男女を分けずに扱うことにし、図２－１－４の◆の位置にある 9 体を生成することにした。ただし、分布の中心にある 9 番は、男性にとっても女性にとっても分布の端に当る可能性があるため、男女それぞれの平均形態も計算することにした（図２－１－４の? と△)。

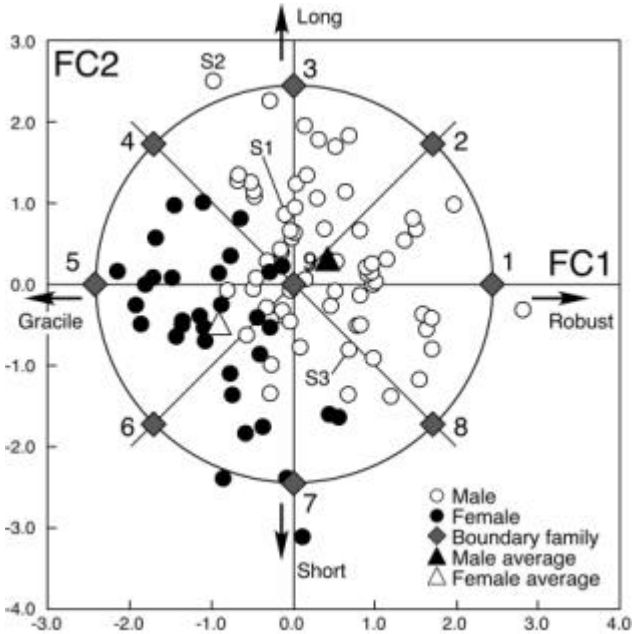


図２－１－４　第１因子及び第２因子に基づく手の寸法計測データの散布図

【参考文献】

1)河内まき子、宮田なつき、持丸正明（独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター、独立行政法人科学技術振興機構・CREST）「手のサイズバリエーション」、科学技術振興機構　戦略的創造研究推進事業「デジタルヒューマン基盤技術」平成１６年度成果報告書（2005 年 3 月 3 日）

2)河内まき子（独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター）、「手の代表形態」科学技術振興機構　戦略的創造研究事業「デジタルヒューマン基盤技術」平成１５年度成果報告書（2004 年 3 月 12 日）

2.1.2　100 人の手の三次元寸法計測データに基づくバウンダリーファミリー

第１章で構築した 100 人（男性 50 人、女性 50 人）の手の三次元計測器から求めた寸法データベースを用いて、日本人を代表するデジタルハンドファミリーを生成した。バウンダリーファミリーの生成は、2.1.1「100 人規模の手の詳細寸法計測データに基づくバウンダリーファミリー」と同様に、SPSS を用いた因子分析により行なった。

Varimax 回転後の結果を表 2-2-1 に示す。固有値が１以上の因子が５つあった。

表２－２－１　因子分析 Varimax 回転後の結果

因　子		寄与率（%）	累積寄与率（%）	因子の解釈
1	16.1	27.1	27.1	指の長さ
2	2.6	21.5	48.6	指の幅や周囲長
3	1.4	13.4	62.0	掌の大きさ
4	1.3	9.3	71.3	－
5	1.1	8.7	80.0	－

第１因子は指の長さに、第２因子は指の幅や周囲長（関節の太さ）に関する因子であり、この２因子で全分散の約 50%を説明する。2.1.1 で述べた 100 人規模の手の詳細寸法計測データとは、第１因子と第２因子の説明が入れ替わっている。第３因子は掌の大きさに関するものであり、第４因子以降は分散の割合も多くない。100 人規模の手の詳細寸法計測データに基づく計算結果と同様に第１因子と第２因子で形態個人差を表現できると考えられる。

図２－２－１に第１、第２因子の得点に基づく被験者の散布図を示す。性差については、2.1.1 の 100 人規模の手の詳細寸法計測データに基づく計算結果と同様に、男性の手の方が長く、ごつい（関節・指が太い）傾向が見られるが、手の詳細計測データに基づく結果ほどには顕著には現れていない。

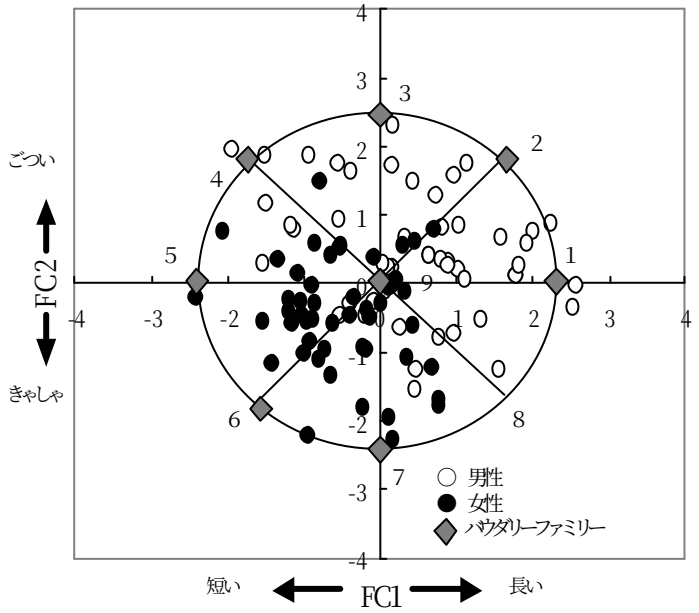


図２－２－１　第１因子（横軸）、第２因子（縦軸）に基づく三次元計測データの散布図

図２－２－１の三次元計測データに基づく、日本人の 95%の手のサイズバリエーションをカバーする 95%確率楕円上にある代表的な手のファミリー（バウンダリーファミリー）を生成する。当初、データのばらつきを考慮して、第３因子まで考慮した三次元の立体楕円上での 15 体の代表パターンの生成を計画していたが、因子分析の結果から、第２因子までで、50%程度の分散が説明できることが分かり、第３因子を取り込んでも効果が少ないことから、第１因子、第２因子の得点に基づく 9 体の代表パターンを生成することにした。

その結果を表 2-2-2 に示す。体型の数字は図２－２－１の確率楕円上（ ◆ ）の数字に対応している。

表２－２－２　三次元計測データに基づくバウンダリーファミリー（寸法）

単位：mm

体型	1 大-平均	2 大-大	3 平均-大	4 小-大	5 小-平均	6 小-小	7 平均-小	8 大－小	9 平均-平均
親指中	63.3	62.7	60.1	57.0	55.3	55.9	58.5	61.6	60.5
親指 2	50.8	48.1	43.8	40.4	39.9	42.6	46.9	50.3	46.9
親指周囲	63.9	68.8	69.7	66.2	60.2	55.3	54.3	57.9	62.6
人指 1	82.5	82.9	78.6	72.3	67.5	67.2	71.4	77.8	76.5
人指中	79.5	79.7	75.6	69.5	65.1	64.9	69.1	75.1	73.7
人指 2	76.4	76.2	71.9	66.0	61.9	62.1	66.4	72.3	70.6
人指周囲	60.1	67.1	68.6	63.8	55.5	48.6	47.1	51.9	58.2
中指 1	87.4	87.9	83.5	76.8	71.6	71.1	75.4	82.2	80.7
中指中	87.3	87.3	82.4	75.5	70.6	70.6	75.6	82.5	80.2
中指 2	86.8	86.3	81.2	74.3	69.8	70.2	75.4	82.2	79.4
中指周囲	62.7	69.3	70.3	65.1	56.9	50.3	49.3	54.5	60.7
薬指 1	77.5	77.5	72.9	66.3	61.6	61.5	66.1	72.7	70.6
薬指中	82.2	82.6	78.0	71.1	65.9	65.5	70.1	77.0	75.2
薬指 2	86.8	87.4	82.7	75.4	69.8	69.1	73.9	81.2	79.5
薬指周囲	57.5	62.4	62.3	57.2	50.1	45.2	45.3	50.4	54.1
小指 1	60.6	60.3	56.6	51.8	48.6	48.8	52.5	57.3	55.4
小指中	63.5	63.5	60.1	55.2	51.6	51.6	55.0	59.9	58.5
小指周囲	48.8	53.7	54.9	51.6	45.7	40.8	39.6	42.9	47.6
親指幅	37.4	39.1	39.6	38.6	36.6	34.9	34.5	35.5	37.2
人指幅	26.7	28.5	28.4	26.4	23.7	21.9	22.1	24.1	25.5
中指幅	26.0	26.9	26.3	24.5	22.6	21.7	22.3	24.1	24.4
薬指幅	26.1	27.3	26.8	24.9	22.8	21.6	22.1	23.9	24.5
小指幅	23.2	24.3	24.2	23.1	21.5	20.5	20.5	21.7	22.5
手長	193.0	195.1	188.0	175.9	165.9	163.8	170.8	183.0	180.6
周囲長 1	228.8	241.9	240.2	224.9	204.8	191.7	193.4	208.7	216.7
手掌長	105.3	107.9	106.0	100.7	95.1	92.5	94.4	99.7	100.4
親指－中指間長	48.0	48.2	46.5	43.7	41.7	41.4	43.2	45.9	44.8

2.1.3　100 人規模の詳細計測データと三次元計測データのバウンダリーファミリーの比較

2.1.2 で求めた三次元計測データに基づくバウンダリーファミリー（9 体）と 2.1.1 の手の詳細計測データ（手計測）のバウンダリーファミリー（9 体）との比較を行った。

手の詳細計測データに基づくバウンダリーファミリーと三次元計測データに基づくバウンファリーファミリーは、因子軸の説明が異なるため、三次元計測データに基づくバウンファリーファミリーについて、第２因子（FC2）を横軸に、第１因子（縦軸）にして、対応するもの同しの比較がしやすいようにした。比較は両者の計測位置に対応関係があると思われる、手長、手掌長、指の長さの代表として第三指長（中指中央）の３種類の計測項目について行った。手の詳細計測データに基づくバウンダリーファミリー寸法を表 2-2-3 に、三次元計測データに基づくバウンダリーファミリー寸法を表 2-2-4 に示す。手の詳細計測データに基づくバウンダリーファミリー寸法の列に、三次元計測データに基づくバウンダリーファミリー寸法の列を対応付けている。

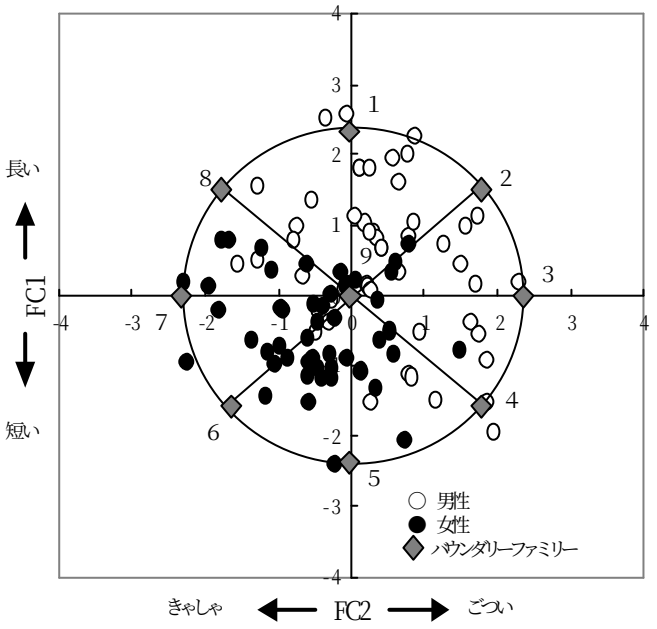


図２－２－２　第１因子（縦軸）、第２因子（横軸）に基づく三次元計測データの散布図

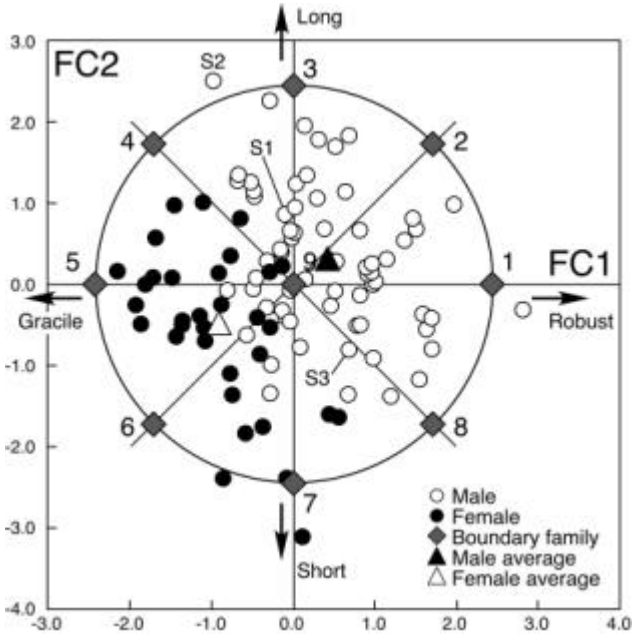


図２－１－４　第１因子及び第２因子に基づく手の寸法計測データの散布図（再掲）

表２－２－３　手の詳細計測データに基づくバウンダリーファミリー寸法

体型	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	大-平均	大-大	平均-大	小-大	小-平均	小-小	平均-小	大－小	平均-平均
手長	195.3	206.2	205.4	193.4	177.2	166.4	167.2	179.2	186.3
手掌長	108.8	114.4	112.9	105.0	95.5	89.9	91.4	99.2	102.1
第三指長	80.1	85.5	86.5	82.6	76.0	70.6	69.6	73.5	78.0

表２－２－４　三次元計測データに基づくバウンダリーファミリー寸法

体型	3	2	1	8	7	6	5	4	9
手長	188.0	195.1	193.0	183.0	170.8	163.8	165.9	175.9	180.6
手掌長	106.0	107.9	105.3	99.7	94.4	92.5	95.1	100.7	100.4
中指中央	82.4	87.3	87.3	82.5	75.6	70.6	70.6	75.5	80.2

表２－２－５に比較結果を示す。全体的な傾向として、「手長」は手の詳細計測データの方が長め、「手掌長」は双方の差は小さいが、バウンダリーファミリーの位置によって傾向が変わる。「第三指長」は手の詳細計測と三次元計測データに基づく場合に殆ど差は見られない。

表２－２－５　三次元バウンダリーファミリーの手計測との寸法比較

体　型	長さの因子	ごつさの因子	手長	手掌長	第三指長
3（1）	平均	ごつい	短め	やや短め	やや長め
2（2）	長い	ごつい	短め	短め	やや長め
1（3）	長い	平均	短め	短め	ほぼ同じ
8（4）	長い	きゃしゃ	短め	短め	ほぼ同じ
7（5）	平均	きゃしゃ	短め	ほぼ同じ	ほぼ同じ
6（6）	短い	きゃしゃ	ほぼ同じ	ほぼ同じ	ほぼ同じ
5（7）	短い	平均	ほぼ同じ	やや長め	ほぼ同じ
4（8）	短い	ごつい	やや短め	ほぼ同じ	やや長め
9（9）	平均	平均	やや短め	ほぼ同じ	やや長め

（注）体型の（　）は対応する詳細手計測の体型

２．２　三次元代表モデル合成

2.2.1　基本モデル

1 名の男性被験者の手の医用画像を複数姿勢で撮像し、これらから皮膚表面形状と関節中心位置を求めることによって、リンク構造をもつ基本三次元モデルを作成し、この基本モデルの寸法が代表形態の寸法に一致するように、基本モデルを変形することによって、9 体の代表形態の 3 次元モデルを作成した。

図２－２－１に示すリンク構造を仮定した。基本モデル生成の詳細は文献[2-2-1,2-2-2]に譲る。図２－２－２に示す 3 通りの姿勢で、青年男性 1 名の右手を CT により撮影した。これらの医用画像から皮膚表面と骨表面を抽出した。姿勢（Posture）1 を基本姿勢とし、各関節位置において、姿勢 i (i=2, 3)での近位の骨を ICP（Iterative Closest Point）法によって基本姿勢でのその骨に一致するよう移動させた後、遠位の骨の近位の骨に対する相対的な回転行列を求めた。回転中心は動かないという仮定のもとに、評価関数 E を最少化することによって回転中心を求めた。

$$E = \sum_{i=1}^{n_{pose}} \left| \mathbf{M}_i \mathbf{c} - \mathbf{c} \right|^2$$

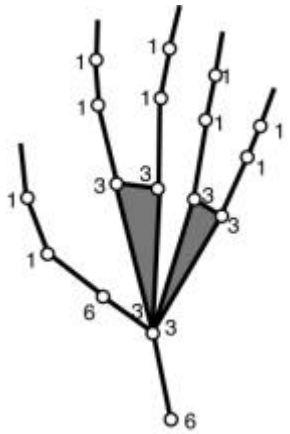


図２－２－１　手のリンク構造モデル

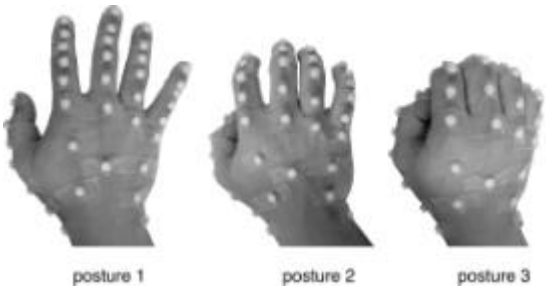


図２－２－２　CT 撮影のための３姿勢

図２－２－３に生成された関節中心をもつ基本モデルを示す。皮膚表面のポリゴンメッシュは、関節が曲がったときにもなめらかな表面を保証するため、スキニングにより記述した[2-2-2]。

図２－２－３　関節中心をもつ基本モデル

【参考文献】

[2-2-1]　N. Miyata, T. Kurihara, S. Kamojima, M. Mochimaru, M. Kouchi, and J. Ota (2003) Method to derive hand link model with MRI images. Proceedings of the 21th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, 1A11.

[2-2-2]　R. Kurihara and N. Miyata (2004) Modeling deformable human hands from medical images. Proceedings of Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation.

2.2.2　代表形態の３次元モデルの作成

9 体のバウンダリー・ファミリーのメンバー及び男女の平均形態の三次元形状モデルを、以下の方法で生成した。2.2.1 で生成した基本モデルの皮膚表面上に図２－２－４に示す特徴点を決定し、40 の寸法を定義した。これらの寸法が、目標とする形態のもつ寸法と一致するように基本モデルを変形することにより、各形態の三次元形状モデルを作成した。

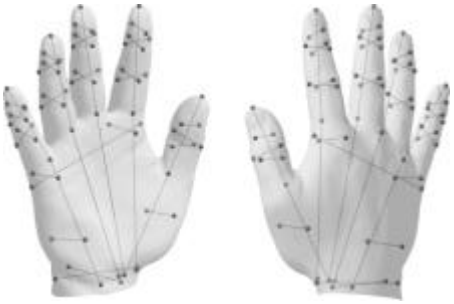


図２－２－４　皮膚表面上の特徴点

基本モデルを変形するためには、手の各部に対して適切な拡大率を決めなければならない。図２－２－４に示す 20 の関節中心位置における拡大率を同時に、XYZ 方向別々に求めた。このとき、最小化する評価関数は、上記 40 の寸法の基本モデルと目標形態の差の総和とした。

各代表形態について計算された拡大率を用いて、代表形態の 3 次元モデルを算出した。9 体のバウンダリーファミリーを図２－２－５に、男女の平均形態を図２－２－６に示す。

最適化計算における残差は、平均して 18.9（14.8～22.9）[mm]であった。1 項目あたり 0.5[mm]となり、手長や第 3 指長の計測者内計測誤差よりも小さい[2-2-3]。残差の大部分は第一指関節厚、第一中手骨根元における手厚、手首厚の 3 項目によるもので、これらにおける残差はそれぞれ 4.0、6.1、3.6 [mm]であった。

これら 3 項目の大きな残差の原因は、基本モデルの姿勢に基づく表面形状の変形だと考えられる。すなわち、医用画像を撮像する間に手の姿勢を保持するため、小指球部を台にのせ、手首をやや外転した姿勢をとったため、皮膚表面が変形し、寸法が整合しなかったためであろう。

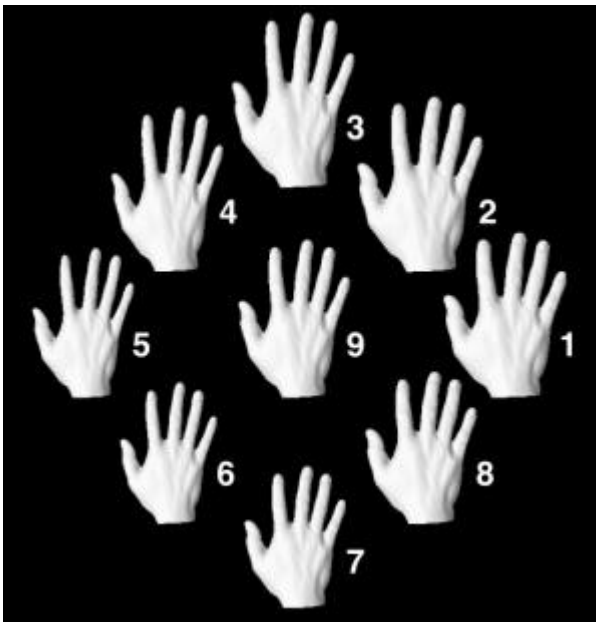


図２－２－５　９体のバウンダリーファミリー代表

図２－２－６　男女の平均形態

2.2.3　**生成されたモデルの評価**

開発した方法により生成されたモデルの妥当性を、個人の手のデータを用いて評価した。101 **名の被験者のうち数名については、**4 **姿勢で手の** MRI **画像を撮像してある。その中から** 3 **名分の第** 2 **指のデータを用いた。**3 **名の被験者（**S1～S3**）の散布図上の位置は図２－１－４　に示してある。**

各被験者につき、基本モデルの計算と同様の方法で、中手指節関節、近位指節間関節、遠位指節間関節の回転中心を求めた（図２－２－７）。計算した回転中心及び指先皮膚表面上に決定した指先点（dactylion**）の座標を用いて、第** 2 **指の基節、中節、末節に相当するリンク長を計算した。こうして** MRI **データから求めたリンク長を真値として、基本モデルの変形により求めたモデルのリンク長を評価した。このような方法を用いたのは、表面の寸法が一致するように変形したため、表面寸法は評価対象にならないためである。**

基本モデルを被験者 S1～S3 **に向けて変形したときの残差はそれぞれ** 17.9、 39.6、15.7 [mm]**であった。手長の大きい** S2 **で残差が大きかった。変形モデルの回転中心から計算し**

たリンク長と、真値との比較結果を表２－２－１に示す。

図２－２－７　MRI 画像からの第２指のリンク長計算
(注)●は回転中心及び指先点（dactylion）

表２－２－１　リンク長の比較

Link	Method	Subject 1	2	3
Proximal	MRI	43.4	48.9	41.1
	Present method	41.3	49.6	40.0
	difference	-2.1	0.6	-1.1
Middle	MRI	27.1	26.6	23.8
	Present method	23.5	23.7	23.6
	difference	-3.5	-2.9	-0.3
Distal	MRI	22.9	23.2	22.0
	Present method	23.0	19.9	23.1
	difference	0.1	-3.3	1.1

被験者 S3 ではどのリンク長も 1[mm]程度の誤差であったが、被験者 S1 と S2 では節により 2～3.5[mm]の誤差があった。この原因として、変形に用いた寸法に指のリンク長に関連した項目が含まれていなかったことが考えられる。基本モデルの被験者の手が男性としてはかなり小さかったため（手長 17.4[mm]）、長さが大きく異なる手へ変形するときに、指全体の長さは一致しても、節の間のプロポーションが変わってしまったのであろう。

このような問題を解決するためには、男女別に平均的なサイズの手の被験者を用いた基本モデルを作成するとともに、変形に用いる寸法を見直す必要があろう。

【引用文献】

3)河内まき子、宮田なつき、持丸正明（独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター、独立行政法人科学技術振興機構・CREST）「手のサイズバリエーション」、科学技術振興機構　戦略的創造研究推進事業「デジタルヒューマン基盤技術」平成１６年度成果報告書（2005 年 3 月 3 日）

【参考文献】

［2-2-3］　M.Kouchi, M.Mochimaru, K.tsuzuki, and T.Yokoi(1996) Random errors in anthoropometry Journal of Human Ergology, 155-166

２．３　MR画像からの骨形状モデル抽出

2.3.1　骨モデル当てはめによる手骨位置姿勢同定手法

様々な姿勢・動きを正確に再現できるモデルを作成するためには、手部の正確なリンク構造(すなわち関節中心位置や関節回転軸)を求める必要がある。これは、複数姿勢の三次元医用画像(MRI)から骨格情報を抽出することで求められる[2-3-1]。そのため、同一被験者の姿勢の異なる複数のMR画像から骨の正確な位置姿勢を迅速に安定して求める技術を開発している[2-3-2]。

三次元医用画像として、被曝の危険性のないMR画像を使用するが、これは骨の領域が不明瞭であり、単純な閾値処理等では骨領域を自動抽出することはできない。そこで、1姿勢分のMR画像から手作業で作成した骨モデルを、同定対象である異なる姿勢のMR画像に当てはめ位置合わせを行う手法によって、骨の位置姿勢を正確に短時間で求めうることを示した[2-3-2]。しかし、使用するMR画像の解像度が手骨の大きさに対して不十分なために、骨モデルの形状は、その作成にどの姿勢の画像を用いるかによって異なってしまう。骨モデルの形状が異なれば、算出される骨の位置姿勢にも差異が生じる。

2.3.1.1　骨モデルの作成と初期位置姿勢設定

本手法は3つのStepから成る。まず、一被験者の姿勢の異なる複数の3次元MR画像の一つから手動抽出によって骨モデルを作成する(Step1)。オペレータは各スライス画像から目視で全ての骨の領域を抽出する。約100枚のスライス画像についてこの処理を終えた後、[2-3-3]の手法を用いてポリゴンを作成する。これを骨モデルとする。

次に、骨モデルの初期位置姿勢を設定する(Step2)。正確な収束結果を得るためには、同定対象である骨の近くに骨モデルの初期位置姿勢を設定する必要がある。なぜなら骨の周辺の組織(筋肉や腱など)も骨と同程度の輝度値を持ち、正確な収束を妨げるからである。画像における骨の位置は手の姿勢によって異なるので、初期位置姿勢の自動設定は困難であり、手動設定が必要となる。この作業を容易にするために、ボリュームレンダリングによって三次元MR画像を可視化している(図2-3-1)。さらに、対象とする骨の輪郭が明瞭に見えるように、任意の領域のみの表示を可能にしている。

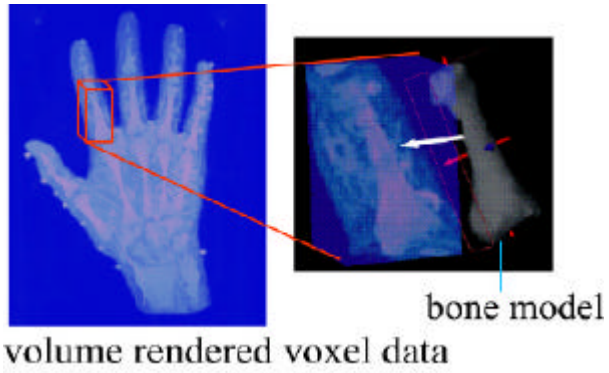


図２－３－１　初期位置設定（骨モデル及びボリュームレンダリングボクセルデータ）

2.3.1.2　最適化計算による位置姿勢同定

骨モデルの初期位置姿勢を設定してしまえば、三次元MR画像において同定対象である骨に最も一致する位置姿勢が自動的に計算される(Step3)。これは、次に定義する評価関数を最大化する位置姿勢を計算することで実現している。

評価関数を定義する前に、図２－３－２に骨モデル座標系とワールド座標系を定義しておく。骨モデル座標系は、骨モデルをすっぽり包み込む最小の箱であるOriented Bounding Box(OBB)を用いて定義する[2-3-4]。骨モデル座標系の原点はOBBの中心であり、座標軸はOBBの各辺と平行に設定する。最も長い辺がX軸に、最も短い辺がZ軸に対応する。ワールド座標系は、同定対象であるMR画像の存在領域に設定する。

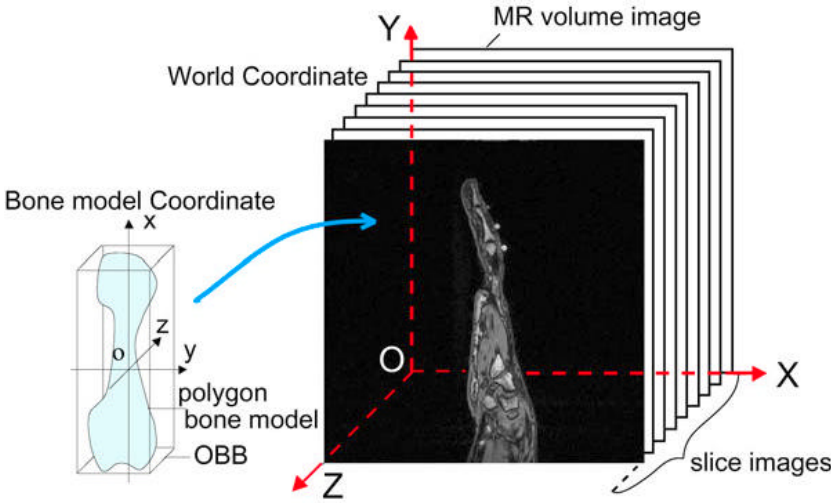


図２－３－２　骨モデル座標系とワールドモデル座標系の定義

2.3.1.3　評価関数

評価関数を設定するに当たって、MR 画像における次のような性質に注目した。

・骨領域は他の領域よりも輝度値が高い。

・骨領域のすぐ外の領域は輝度値が低い。

そこで、骨ポリゴンモデル内部に代表点を設け、その代表点における輝度値の和を評価関数Pとして定める。

$$P=\sum_{i}^{n} bi$$

n: 代表点の数

bi: i 番目の代表点における三次元MR画像の輝度値となる。骨モデルのOBB を格子状に等分割した時に，ポリゴン内部に存在する格子点を代表点とする(図２－３－３)。

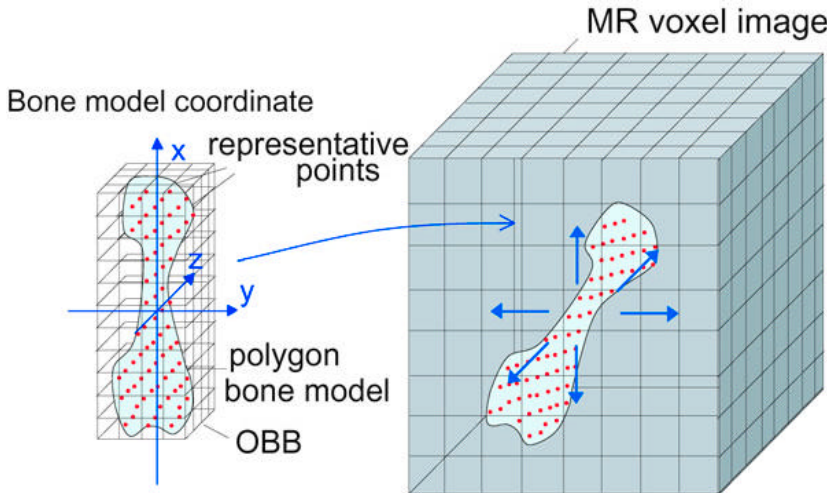


図２－３－３　The Overview of Registraton

2.3.1.4　探索方法

対象とする骨の位置姿勢は、評価関数を最大化するように骨モデルの平行移動と回転を繰り返すことによって計算される。反復ステップ毎の探索を単純にするために、12近傍を設定し、最も評価関数が大きくなる近傍に動くことにする。12近傍とは，ワールド座標系におけるx、y、z軸方向の平行移動、モデル座標系におけるx、y、z軸周りの回転のうち、1方向に沿って微小に移動した位置姿勢である。6自由度×(±の2方向)で1近傍とする。評価関数がこれ以上大きくならなくなった時点で探索終了とする。

以上のように、MR 画像から骨領域を効率よく抽出するために、１姿勢分についてのみ手作業でしきい値を設定して抽出を行い、他の姿勢については、手作業で抽出した骨形状モデルを用いて MR 画像から骨領域を自動抽出する技術を開発した。平均誤差は骨長の 1%であり、手作業と同程度の精度が得られることが分かった。これにより、多数の MR 画像データを効率よく処理できるようになった（図２－３－４）。

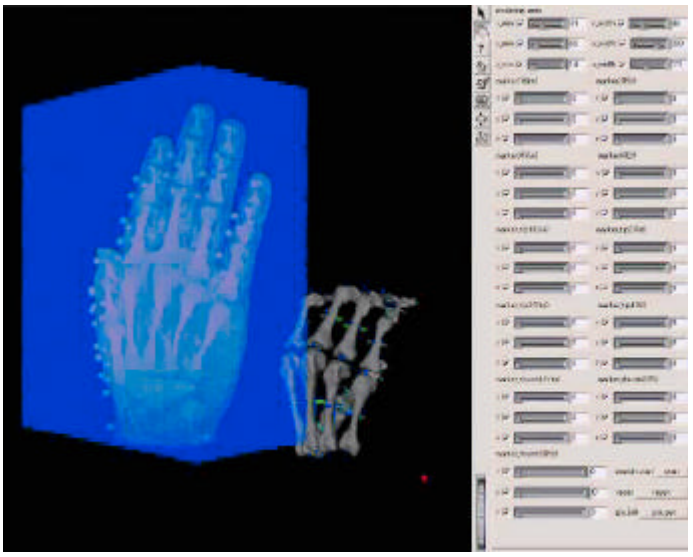


図２－３－４　MR 画像からの骨位置姿勢同定

【参考文献】

[2-3-1] 宮田なつき, 栗原恒弥, 鴨島里実, 持丸正明, 河内まき子, 太田順: “医用画像を用いた手部リンク構造導出手法の検討”, 第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1A11, 2003.

[2-3-2] S. Kamojima, N. Miyata, and J. Ota: “Identification of Position and Orientation of Hand Bonesrom MR Images by Bone Model Registration”,In the Proceedings IROS to be appeared, 2004.

[2-3-3] Ryu J. H., Kim H. S., Byun H. S., Lee K. H.:”High Quality isosurface generation from medical images,” In the Proceedings of the 31th InternationalConference on CIE, 86-91, 2003.

[2-3-4] S. Gottschalk, M. C. Lin, and D. Manocha:”OBB-Tree:A Hierarchical Structure for Rapid Interference Detection,” In the Proceedings of ACM Siggraph, 1996.

【引用文献】

4)鴨島里美（東京大学）、宮田なつき（独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター、独立行政法人科学技術振興機構、CREST）、太田順（東京大学）、「骨モデル当てはめによるMR画像からの手骨位置姿勢同定－骨モデルに適した撮像姿勢の検討－」、第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集（2004年9月）

２．４　手の構造モデル

製品設計に役立つ手のモデル化のためには、操作する対象の指先の位置姿勢を精度よ

く再現できることが大前提であり、それにはまず、人の手の骨格の詳細な構造を知っておく必要がある。例えば、指部分の関節の回転軸は互いに平行であるとしてモデル化されることが多いが、実際にはそうでない。こうした知見は、解剖学の分野ではよく知られているが、生きた人間の骨格に関して、定量的な検証がなされていない。

ここでは、医用画像からの骨格データ抽出、しきい値手動調整による骨格ポリゴン作成、手のリンク構造導出等についての、手の構造モデルを検討する。これらの手の構造モデルと第３章の運動計測データと整合させることで、機械部品等に対する把持姿勢のモデル化、これらの寸法・構造・形状等の再現が可能なデジタルハンドソフトウエアの開発が可能になる。

2.4.1　医用画像からの骨格データ導出

生きた人間の動きに伴う解剖学的な構造特性を知るために、同一の被験者の 4 つの静止姿勢の MR 画像を複数計測する（図２－４－１）。その計測条件を表２－４－１に示す。

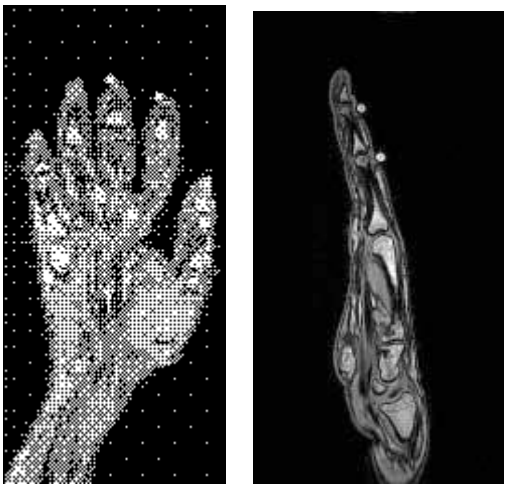


図２－４－１　MR 画像撮影

表２－４－１　スキャニングプロトコル及びボクセル情報

Magnetic field strength	0.95T
Scanning time/Posture	12mm 13sec
Field of view	250×250mm
(Resolution)	256×256
Slice interval	1.5mm
Physical pixel spacing	0.98×0.98mm
Bit per pixel	8bits/pixel

１姿勢につき計測時間が 12 分と長いことから、この間被験者が一定の姿勢を保てるよう、

手型やシリコンゴム等の固定具を用いている。また、解剖学的構造特性の解明のため、皮膚表面に複数の球状マーカを貼付して計測している。

ここで MR 画像では骨以外の領域も骨と同程度の輝度値を持ち、境界があいまいであるため、単純なしきい値で骨領域を自動抽出することは困難である。そのため、手動で骨領域を抽出し、ポリゴンとして骨格データを導出する一方で、その省力化のための開発が必要である。

2.4.2　しきい値手動調整による骨格ポリゴン作成

指先の末梢骨、中ほどの中節骨や基節骨、根元の中手骨のように、一口に骨領域といっても部位毎に骨領域抽出に適したしきい値は異なる。そこで、オペレータが MR 画像１枚１枚について、適切なしきい値になるよう部位毎に調整し、骨領域を抽出する。すべての画像で処理が完了したら、これを合せて三次元骨ポリゴンを作成する。

この姿勢での問題点は、オペレータが１姿勢分のデータにつき、100 枚程度の画像を処理する必要があり、オペレータの負担が大きいこと、姿勢が異なるとスライスへの骨領域への現れ方も異なり、同一被験者の同一の骨にもかかわらず、姿勢毎に骨格ポリゴンデータの形状が大きく異なりやすいという問題がある。同一オペレータの繰り返し精度及びオペレータ間の導出結果の違いは、平均で 0.1～0.7mm であった。

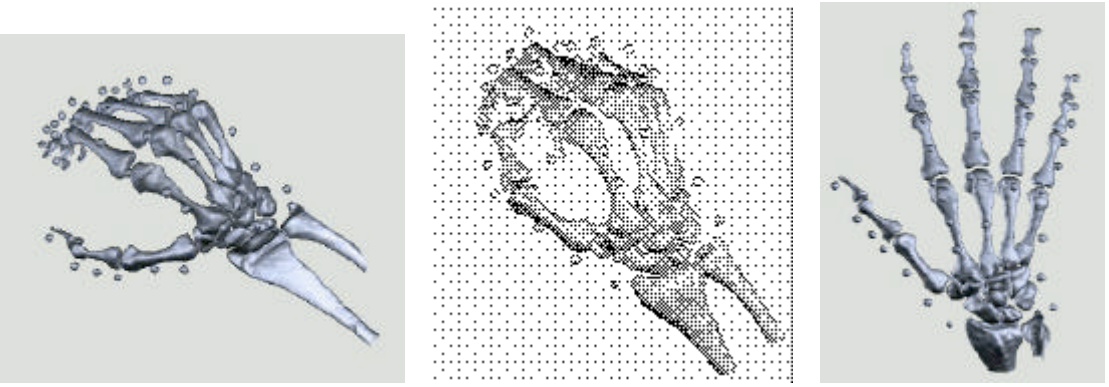


図２－４－２　骨格形状モデル

MR 画像中の骨領域をポリゴン形状モデルとして抽出し、同一被験者の同一骨を異なる姿勢で重ね合わせた。なお、ポリゴン数が異なる形状データの重ね合わせには ICP（Iterative Closest Point）アルゴリズムによって、形状誤差が最小になるように重ね合わせる同時変換行列を求める方法を活用している（図２－４－３）。

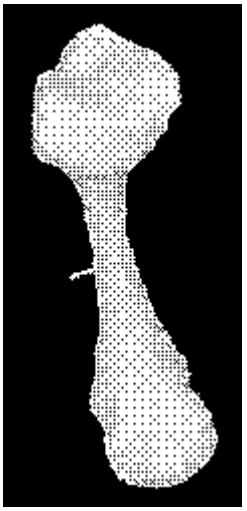


図２－４－３　ICP による異なる姿勢の同一骨形状の位置あわせ

【引用文献】

5) 宮田なつき（産総研）、栗原恒弥（㈱日立製作所）、鴨島里美（東京大学）、持丸正明（産総研）、河内まき子（産総研）、太田順（東京大学）、「医用画像を用いた手部リンク構造導出手法の検討」、第 21 回日本ロボット学会学術講演会（2003.9.20～22）

6)J.H. Ryu, N. Miyata, M. Kouchi, M. Mochimaru, K. H. Lee：”Analysis of skin movements with respect to bone motions using MR images”, International Journal of CAD/CAM, Vol.3, No.2, pp. 61-66 (2003).

7)宮田なつき（独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター）、栗原恒弥（㈱日立製作所中央研究所）、「デジタルハンド～手の解剖学的構造特性と表面形状モデリング」、科学技術振興機構　戦略的創造研究事業「デジタルヒューマン基盤技術」平成１５年度成果報告書（2004 年 3 月 12 日）

8)宮田なつき（独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター、独立行政法人科学技術振興機構、CREST）、栗原恒弥（㈱日立製作所中央研究所）、「デジタルハンド～構造解明・運動計測・表面変形」、科学技術振興機構　戦略的創造研究事業「デジタルヒューマン基盤技術」平成１６年度成果報告書（2005 年 3 月 3 日）

2．5　まとめ

101 名（男性 68 名、女性 33 名）の被験者についての、手の詳細計測データ（81 箇所）に基づき、手のバウンダリーファミリー（統計的分布の境界線上に位置する体型ファミリー）の寸法を合成した。さらに、その寸法を再現する骨格・モデル・表面形状データを合成した。また、100 名（男性 50 名、女性 50 名）の被験者についての三次元計測データ（27 箇所）に基づく、手のバウンダリーファミリーを作成し、手の詳細計測データとの比較を行った。

骨格構造を定量的に取得するため、手の MR 画像撮影を行った。異なる姿勢の手を MR で撮影し、その骨領域をポリゴン形状モデルとして抽出し、同一被験者の同一骨を異なる姿勢で重ね合わせた。なお、ポリゴン数が異なる形状データの重ね合わせには ICP（Iterative Closest Point）という方法を用いている。

MR 画像から骨領域を効率よく抽出するために、1 姿勢分についてのみ手作業でしきい値を設定して抽出を行い、他の姿勢については、手作業で抽出した骨形状モデルを用いて MR 画像から骨領域を自動抽出する技術を開発した。これにより、多数の MR 画像データを効率よく処理できるようになった。

第３章　デジタルハンドの試作

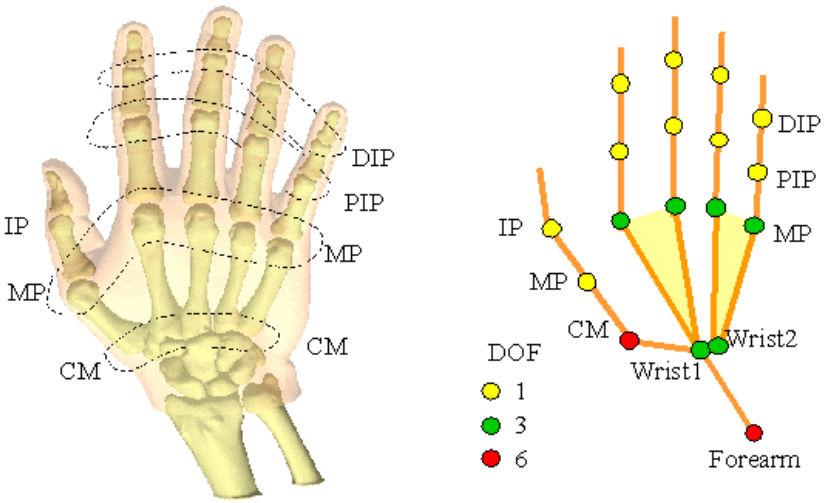
３．１　骨ポリゴンを用いたリンク構造解明

製品設計に役立つ手のモデル化のためには、操作する対象の指先の位置姿勢を精度よく再現できることが大前提であり、それにはまず、人の手の骨格の詳細な構造を知っておく必要がある。例えば、指部分の関節の回転軸は互いに平行であるとしてモデル化されることが多いが、実際にはそうでない。こうした知見は、解剖学の分野ではよく知られているが、生きた人間の骨格に関して、定量的な検証がなされていない。このため、手の複数の姿勢で医用画像を取得して、骨格をそれぞれポリゴンとして取り出し、その運動を分析する方法を構築した。

3.1.1　手のリンク構造モデル

人の手は､第４指および第５指の CM 関節が若干動くことで手のひらのアーチが変化し、これらの指の指先位置に影響する。しかし、キャリブレーション動作から正確な関節中心位置を同定できるほどの可動範囲はない。

そこで本スタディでは図３－１－１(b)に示すようなリンクモデルとして扱うことにする。手のひらを２つの部分に分けることで､CM 関節を直接扱うことなく手のひらのアーチを考慮する。また、親指の根元の CM 関節は、複雑な動きをすることから６自由度として扱う。



(a)　　(b)

図３－１－１　手のリンクモデル

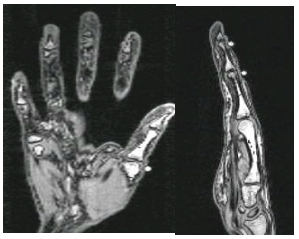
3.1.2　リンク構造の導出

関節回転軸は２つの姿勢を組み合わせることで求まる。組み合わせる姿勢による回転軸の違いを検証するため、図３－１－２に示す３姿勢を計測した。MRI 画像の一例と撮影条

件を図３－１－３に示す。

姿勢１　　姿勢２　　姿勢 3

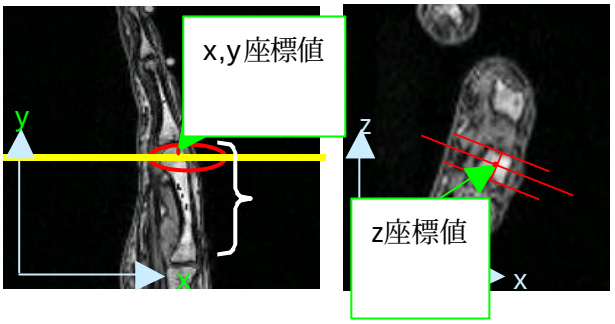
図３－１－２　MRI の計測姿勢



Pixel Size	0.98mm
Number of Slice	100
Thickness of the Slice	1.5mm
Measuring Time	12min 13sec

図３－１－３　MRI の画像例及び計測条件

リンク構造は、他との比較や運動計測等に利用することを考え、ある一つの基準姿勢（例えば図３－１－２の姿勢 1）の座標系において導出する。基本的には、親リンクの座標系を決定し、これに隣接して運動する子リンクの姿勢変化分から瞬時回転中心軸を求める。ある関節の自由度が１の場合、この回転軸は一定となるはずである。本スタディではリンク構造を求めるに当たり、手法１～手法３の３種類を採用し検討した。手法１では，図３－１－４に示すように、二次元画像の集合としてデータを扱い、関節中心を視認により座標値を読み取り決定する。大規模なデータ処理を必要とせず、医療分野等で一般的に用いられる手法である。関節回転軸は、図３－１－５に示すように、指節中央付近に貼付したマーカを用いて親リンクの座標系を決定し、その座標系内で表現された子リンクの姿勢変化から決定する。手法２及び手法３では、MRI 画像から骨格のポリゴンを抽出しリンク構造導出に用いるが、 親リンクの姿勢を一致させる手法がそれぞれ異なる。手法２ではポリゴンの慣性主軸（幾何的分布のみ考慮）によりバウンディングボックスを定めることで親リンクの姿勢を一致させ、子リンク間の同次変換行列を求める。手法３では親リンクのポリゴンの姿勢を、ポリゴンの法線方向距離の総和を最小化することで一致させる。なお実際の計算には、市販ソフトウェアの GeoMagicStudio5.0（Raindrop Geomagic 社）の Registration 機能を利用した。



(a)　　(b)

図３－１－４　手法 1 の関節中心の決定

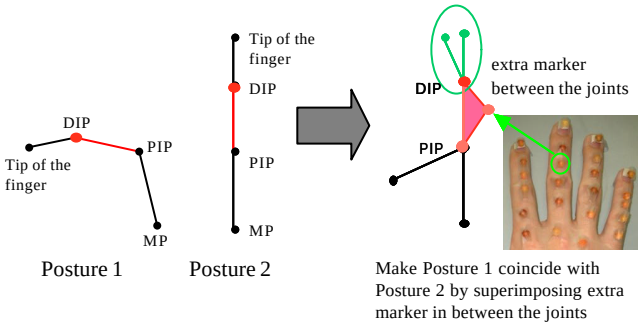


図３－１－５　親リンク座標系から子リンク座標系の決定

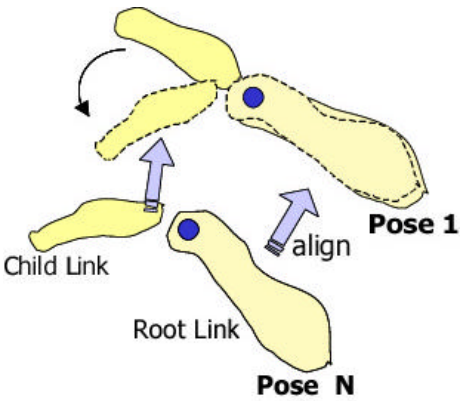


図３－１－６　親リンクと子リンクの相対運動

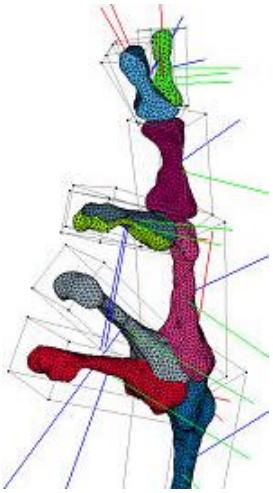


図３－１－７　親リンクに対する子リンクの相対的な位置を重ねて表示（人差指）

3.1.3　導出されたリンク構造の考察

求めたリンク構造のうち、人差指の導出結果について比較・考察を行う。ここで、手法２及び手法３では、瞬間関節回転軸（直線）が出るだけで関節中心位置は一意には定まらないが、姿勢 1 と姿勢 2 及び姿勢 1 と姿勢 3 という２つの姿勢組み合わせから求めた瞬間関節回転軸(直線)の交点を求めると、図３－１－８に示すように、手法１のものと近い位置に存在し、MP 関節についてはほぼ中手骨骨頭中心にきていることが分かる。したがって、自由度が２以上でポリゴンの十分大きい MP 関節などでは、これらの交点を関節中心と定めてよいと考えられる。これに対し、手法２の慣性主軸を用いる手法などでは、PIP 関節、DIP 関節と指先へ行くほど骨頭中心から離れる傾向にある。これは、指先に行くほどポリゴンが小さくなるために、手法２及び３のようにポリゴンによる姿勢一致を用いる手法が、姿勢間での骨ポリゴンの差の影響を大きく受けるためと考えられる。しかし、瞬間回転軸と親リンクの長軸を通り屈伸方向に平行な平面との交点を求めると、これは手法１の関節中心位置とよりよく一致する。したがって、指先などの関節では、この面に投影したものを関節中心として定めることで妥当な値を求められると言える。

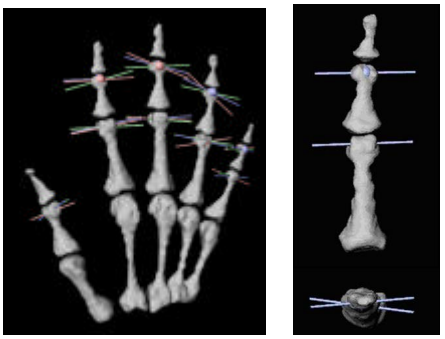


図３－１－８　姿勢 1 と姿勢 2 及び姿勢 1 と姿勢 3 の組み合わせから計算した瞬間回転軸の交点）

関節回転軸の変動については、手法 2 及び手法３で最大でも 6 度の差で、関節角度については、最大でも 1.5 度程度の誤差となっている。MRI のボクセルデータが 1.5 x 0.98 x 0.98 mm であることを考えると、長手方向に約 30mm 程度の基節骨で 1 ボクセル分の誤差が生じた場合、3 度程度は簡単に姿勢がずれることになる。このことからリンク間の相対関係については、非常に良好な結果が出ていると言える。これに対し手法１では関節角度の誤差が若干大きく出ている。これは、関節中心以外に節上につけたマーカを姿勢一致の計算に用いるために、姿勢変化に伴う骨とマーカの関係が骨の長手方向以外に変化する影響を大きく受けるためと推測される。

これらを踏まえて、実際の関節中心軸を見てみる。PIP 関節や DIP 関節は１自由度ピンジョイントとしてモデル化されることが多い。しかし、本来その形状は鞍関節であり機構的に拘束された１自由度関節ではない。今回求めた手法のうち、比較的ずれが小さいと考えられる手法 3 の結果から、同関節が単純な１自由度でなく、関節の屈曲に応じた軸の変動が起こり得ることを示唆している。ただし、図３－１－９を見てもわかるように、異なる姿勢の MRI 計測データから抽出したポリゴンの形状の違いが、特に指先の末節骨で大きいため、姿勢一致の計算が手法２でも手法３でも適切になされていない可能性が高く、軸の変動に関しては更なる検証が必要である。

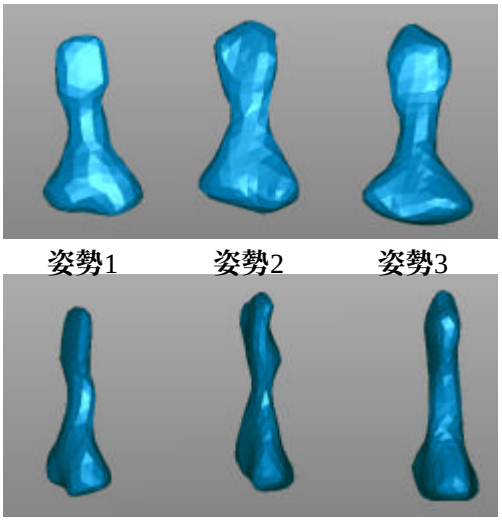


図３－１－９　異なる姿勢のポリゴンの違い

【引用文献】

1) 宮田なつき（産総研）、栗原恒弥（㈱日立製作所）、鴨島里美（東京大学）、持丸正明（産総研）、河内まき子（産総研）、太田順（東京大学）、「医用画像を用いた手部リンク構造導出手法の検討」、第 21 回日本ロボット学会学術講演会（2003.9.20～22）

http://www.dh.aist.go.jp/research/awaseru/dhand-link/dhand-link1.html.ja

３．２　モーションキャプチャからのリンク構造同定・姿勢計測

手の動きを計測する方法としては、グルーブ型のセンサなどもあるが、被験者の手の大きさによってはグローブのサイズが合わず、うまく測ることができず、計測可能な自由度も不足している。そこで、多様な被験者の手を必要な自由度で計測するという観点から、手の表面に多数のマーカを貼付してその位置を計測するモーションキャプチャによる動作計測を考える。

人間の手の場合、比較的小さな空間に、33 という高自由度のリンク構造が含まれる。すなわち、隣り合う指通しの位置関係が近く、同じ指節内でもマーカ同士の間隔を大きくとることができないため、オクルージョン（隠れ部位）が多発する。

また、皮膚変形が全身に比べて相対的に大きく、各関節の可動範囲も小さいため、全身のリンク同定技術を直接適用することは難しい。このため、これらの問題を考慮し、指先位置が 1～2mm の精度で再構成可能であるようなリンク構造の同定と姿勢計測方法を提案する。

3.2.1　キャリブレーション動作を使ったリンク構造の計算

隣接する指同士の関節や、一つの指節の小ささなどに起因するオクルージョンを避けるため、マーカ数を少なくする必要がある。そこで、ここでは図３－２－１に示すようなマーカ配置で運動を計測する。

図３－２－１　マーカ配置

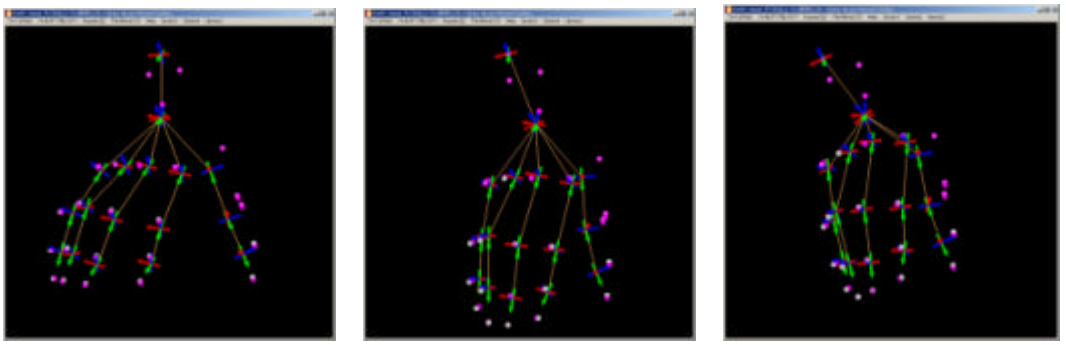
少ないマーカ情報から、高次元のパラメータ同定問題を解くために、ここでは「解剖学的特徴点を考慮した問題の部分単純化」と、「キャリブレーション動作の規定」を行なった。

例えば、第 2 指から第 4 指の PIP 関節以遠については、PIP 関節がある程度曲がっていることを仮定し、MP、PIP、DIP 関節の直上に貼付した 3 マーカのなす平面内でのリンク

パラメータ同定問題を考えることで、三次元のリンク同定問題を二次元の問題に単純化することにした。ただし、このとき DIP 関節と PIP 関節の関節回転軸は平行ではないといった解剖学的特徴を考慮することで、単純化の弊害を回避している。

また、Wrist 関節位置を同定する場合、MP 関節直上に貼付したマーカを用いるが、MP 関節の姿勢（関節角度）が変化すると、Wrist 関節との距離が変化するため、同定精度が悪くなる。そこで、MP 関節の姿勢は固定するという規定を加える。

全関節について、同様の対策を行うことによって、図３－２－２に示すように円筒を持つ姿勢を、指先再構成精度を平均 1.6mm で再現することが可能となった。



(a) Diameter=100mm　(b) Diameter=62mm　(c) Diameter=50mm

図３－２－２　円筒を持つ姿勢の再構成（指先位置の再構成精度　平均 1.6mm）

http://www.dh.aist.go.jp/research/awaseru/dhand-link/dhand-link2.html.ja

【引用文献】

2)宮田なつき（独立行政法人産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センター、独立行政法人科学技術振興機構、CREST)、栗原恒弥（㈱日立製作所中央研究所)、「デジタルハンド～構造解明・運動計測・表面変形」、科学技術振興機構　戦略的創造研究事業「デジタルヒューマン基盤技術」平成１６年度成果報告書（2005 年 3 月 3 日）

３．３　デジタルハンドモデル

本スタディで試作する「デジタルハンド」とは、コンピュータ上に創り出す多様な仮想ユーザの「手」がコンピュータ上に記述された機械システムに対して操作をすることにより、設計段階で機械システムの持つ潜在的な問題箇所を洗い出すための技術である。手の機能再現に特化することで、従来、見過ごされてきた機械システム設計分野の人間適合性向上に資するものであり、デジタルハンドの試作開発を行うことによりコンピュータ上に

様々な手の大きさの再現を行い、把持姿勢の違いによる製品の外観形状の評価を行うことにより、デジタルハンド技術のキーとなる技術的ブレークスルーの確立を行うものである。具体的には、製造者は設計段階において、コンピュータ上で製品の操作性等の評価を行うことができ、利用者個人の手の大きさや機能に適合した付加価値の高い製品・機器の製造が可能となる。また、高齢者等の利用者の手の大きさや機能に適合した、使いやすい製品・機器を得ることができ、質の高い生活の形成に大きな期待がされている。

本スタディで試作するデジタルハンド・ソフトウエアを用いて、シリンダー形状を代表とする製品の把持姿勢を可視化することにより、デジタルハンド技術の課題を明確にするとともに、企業の開発者等に具体的に提示して、デジタルハンドの利用展開や応用可能性等のアイデアを引き出すことも目的とする。

3.3.1　デジタルハンド・ソフトウエア

手のリンク構造モデル（3.1）とモーションキャプチャによる手の運動計測（3.2）の手の運動データとを整合させることにより、機械部品等に対する把持姿勢のモデル化を行う。手がシリンダー状のものを把持する等の姿勢を表現でき、機能寸法を再現できるデジタルハンド・ソフトウエアの製作を行なった。これは、将来的に指先反力、変形等のより高機能のモデルを組み込める「デジタルハンド・プラットフォーム」としてのコンピュータ・ソフトウェアになっている。同時に、寸法・姿勢を模擬するデジタルハンドを CG 表示・操作する GUI を備え、関節特性等の評価情報を出力するソフトウェアを開発した。

3.3.2 デジタルハンド・ソフトウエア仕様

(1)機能

手が製品を操作する時の手の寸法、形態、把持姿勢、運動等の以下のような機能を、製品の形状と合わせて表示する。

・指定した形状、リンク長で入力した姿勢の表示
・指定した形状で様々なリンク長データに対する標準姿勢の手の表示
・標準姿勢の手に対し、他の姿勢を付与した表示

(2)入力ファイル

以下のデータを読み込むことができる。

・手の構造モデルセット
・リンク構造（関節自由度、関節位置）を手の骨 20 個で構成
・手表皮形状
　＊データは Wavefront OBJ 形式

(3)品形状データ

・手の操作対象である製品の形状を記述

＊形状データは Wavefront OBJ 形式

(4)可視化（CG 表示）

データを可視化する機能を有する。手の表面形状、リンク構造を製品形状データと合わせて投影図が表示できる。

・画像基本動作処理

・手部の骨、表面表皮の表現

・各種姿勢の表示

(5)操作・表示・調整等の機能

・拡大／縮小、カメラ視線の変更（Walk／物体中心の回転）

・オブジェクト毎に表示の ON／OFF

・＊オブジェクト；手の表面形状、リンク構造、座標系、製品形状の４つ

・オブジェクト毎に非透明／半透明の切り替え

・形状色、背景色可変

・姿勢デモ、変形デモ

・デモスピードの変更

(6)動作プラットフォーム

・Windows XP 等の Microsoft　Windows 環境で動作

・GeForce 等、一般的なグラフィックボードに対応

3.3.3　表示

デジタルハンド・ソフトウエアは、手が製品を操作する時の手の寸法、形態、運動等の機能を、製品の形状に合わせてコンピュータの画面上に表示する。オブジェクトとしては、20 個で構成される手の骨、関節リンク構造、手の表皮形状、手の表皮の透明／半透明の切り替えによる内部構造（骨、関節リンク構造）の表示、回転によるカメラ視線の変更、拡大／縮小等が可能となっている。

以下に骨（図 3-3-1）、関節リンク構造（図 3-3-2）、表皮（図 3-3-3）及び表皮不透明による骨・関節リンク（図 3-3-4～図 3-3-6）の表示例を示す。

①骨

図 3-3-1　骨の表示

②関節リンク構造

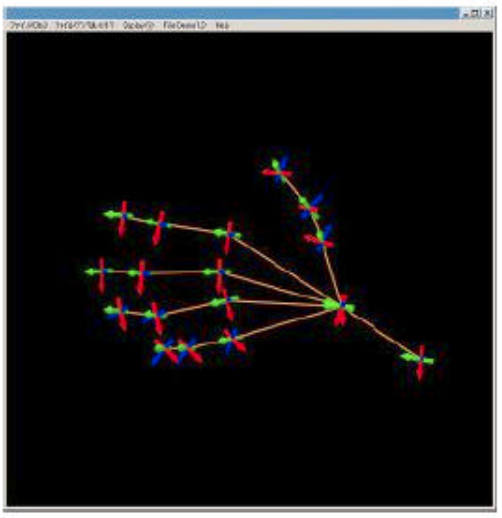


図 3-3-2　関節リンク構造の表示

③表皮

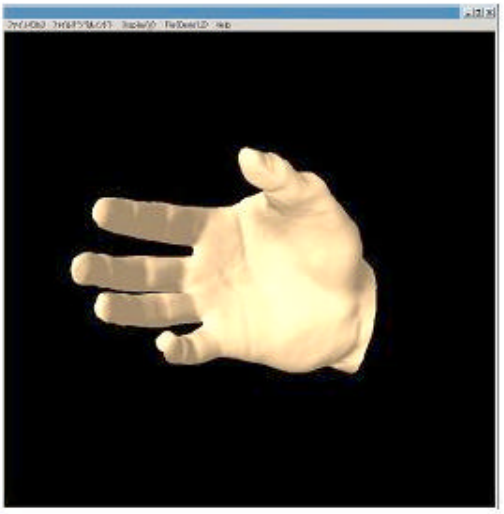


図 3-3-3　表皮の表示

④表皮半透明（骨表示）

図 3-3-4　表皮半透明による骨の表示

⑤表皮半透明（骨・関節リンク表示）　⑥表皮半透明（骨・関節リンク表示）[回転]

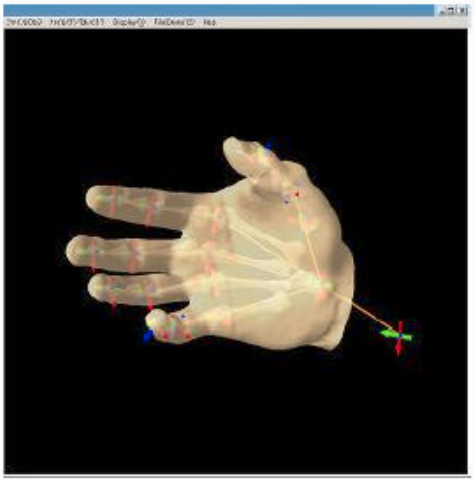


図 3-3-5　表皮半透明による骨・関節リンクの表示

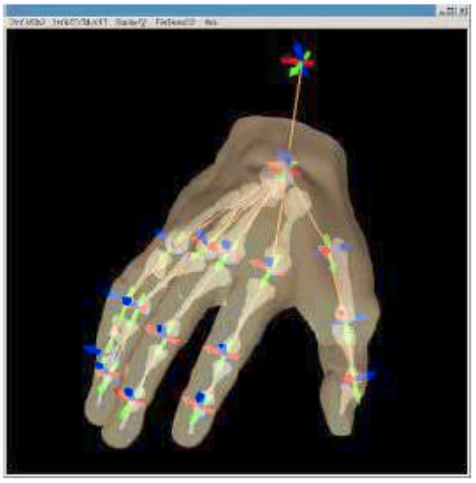


図 3-3-6　表皮半透明による回転した骨・関節リンク表示

3.3.4　把持姿勢

デジタルハンド・ソフトウエアは、手が製品を操作する時の手の寸法・形態・把持姿勢・運動等に関する、指定した形状、リンク長で入力した姿勢、指定した形状で様々なリンク長データに対する手の標準姿勢、標準姿勢の手に対する他の姿勢を付与する等の表示機能を、製品の形状と合わせて表示できるようになっている。

手の構造モデルセット、手の骨 20 個で構成したリンク構造（関節自由度、関節位置）、手表皮形状、手の操作対象である製品形状の入力データに基づく、製品と手の関係を表示し、製品とのインタラクションを把握できるようになっている。

表示画面の例を図３－３－７に、また、様々な大きさのシリンダー状の製品に対する把持姿勢の再現結果を図３－３－８に示す。

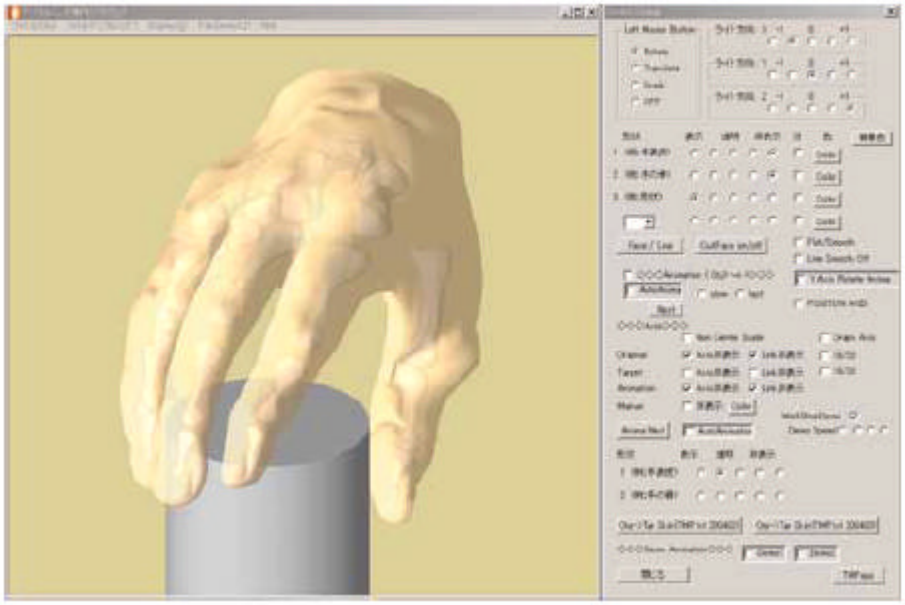


図３－３－７　シリンダー形状の把持姿勢表示画面例

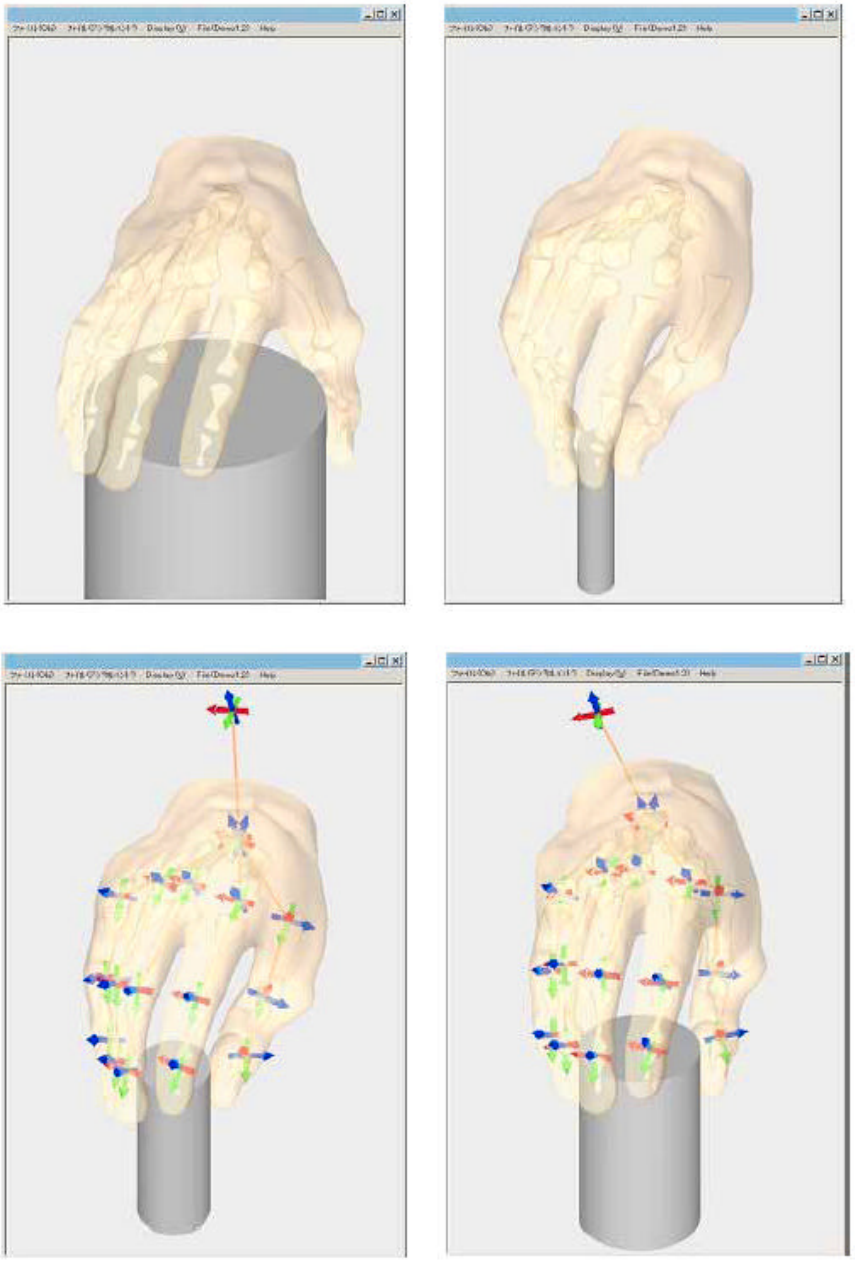


図３－３－８　デジタルハンドによる様々なシリンダー形状の把持姿勢

３．４　デジタルハンドソフトウェアの展開

本スタディで開発したデジタルハンドソフトウェアは、手の寸法、構造、形状、姿勢のモデルを有し、与えられた個人差パラメータに応じてあり得るサイズ・姿勢の手モデルを可視化表示するものである。また、このときのリンク構造、骨格構造、表面形状データを

出力保存できる機能を有しており、現時点でも、手と製品との幾何学的な干渉のチェック（指先が入るか、指先が届くかなどのチェック）に用いることができる。しかし、「はじめに」で述べたとおり、本来、デジタルハンドの目指す目標はここにとどまらない。デジタルハンドは、産業界で普及しつつあるデジタルモックアップのコンセプトに基づくもので、製品と人間の相互作用を再現し、可視化するとともに、ある得るユーザ（人間）のばらつきを再現するためのものである。本スタディで開発した機能は、手の骨格構造と寸法バリエーション、形状、姿勢であるが、さらに、製品と接触することによって生じる指先反力、それによる指先変形と摩擦、そのときに指先感覚器に伝達される感覚情報などの機能モデルを付加していく必要がある。また、指先反力を発生する筋力を推定し、負担感を評価するためには筋骨格系モデルが必要であろうし、それは手首より遠位の手掌の部分にとどまらず、前腕から上肢全体に関する構造モデルも必要となろう。本スタディで開発したデジタルハンドソフトウェアは、これらの機能を将来的に付加することを想定したデータ・クラス構造を有している。また、さまざまな個人差に対応するために、骨形状、寸法、ランドマーク、表面形状、姿勢を表すパラメータファイルを規定し、それらをデータベースと連携できるプログラム構造となっている。

３．５　まとめ

手の運動データを、手の構造モデルと整合させることで機械部品等に対する把持姿勢のモデル化を行った。異なる姿勢の MR 画像から抽出した骨について、近位（根本の方）の骨で重ね合わせを行い、遠位の骨が姿勢の変化に伴ってどのように回転しているかを定量的に同定した。具体的には、近位の骨座標系に対する遠位骨座標系の回転軸を表すヘリカル軸を同定した。この結果、回転軸がねじれていることが明らかになった。このねじれ構造を定量的にモデル化することで、正確な手の運動計測を実現した。この同定した構造モデルをベースとして、少ない表面マーカから多自由度の手の動きを正確に計測する技術を開発し、計測した角度を基本構造モデルに再入力して、手先位置の誤差は 2mm 以下の姿勢を再現できることが分かった。

手がシリンダー状のものを把持する等の姿勢を表現でき、機能寸法を再現できるデジタルハンド・ソフトウエアの製作を行った。これは、将来的に指先反力、変形等のより高機能のモデルを組み込める「デジタルハンド・プラットフォーム」としてのコンピュータ・ソフトウェアになっている。

本スタディで試作した「デジタルハンド」により、コンピュータ上に様々な手の大きさの再現を行い、把持姿勢の違いによる製品の概観形状の評価が行えるようになり、デジタルハンド技術のキーとなる技術的ブレークスルーの見通しが得られた。

第４章　スタディの成果

本スタディでは、手をインタフェースとする機械システムを、様々な利用者の手の特性に適合するように設計するためのデジタルハンド技術について、日本人の手指の１００人規模の寸法計測を行い、そのデータを基に、機械製品の代表的な形状の把持姿勢を再現できるデジタルハンドの試作を行った。

以下に結果の概要を示す。

(1)手指の寸法データベースの構築

手の三次元計測器を用いた、100名（20代から70代の男女各50名）の手の形状データを取得し、これから27箇所の手の寸法データを計算し、100名分の手指寸法データベースを構築した。

(2)手の寸法代表ファミリーの合成

(1)とは別個に、101 名（男性 68 名、女性 33 名）の被験者について、手の詳細寸法計測（81 箇所）を行い、手のバウンダリーファミリー（統計的分布の境界線上に位置する体型ファミリー）の寸法を合成した。さらに、その寸法を再現する骨格・モデル・表面形状データを合成した。

また、(1)の 100 名（男性 50 名、女性 50 名）の被験者についての三次元計測データ（27 箇所）に基づく、手のバウンダリーファミリーを作成し、詳細手計測データとの比較を行なった。

骨格構造を定量的に取得するため、手の MR 画像撮影を行った。異なる姿勢の手を MR で撮影し、その骨領域をポリゴン形状モデルとして抽出し、同一被験者の同一骨を異なる姿勢で重ね合わせた。なお、ポリゴン数が異なる形状データの重ね合わせにはICP（Iterative Closest Point）という方法を活用している。

MR 画像から骨領域を効率よく抽出するために、1 姿勢分についてのみ手作業でしきい値を設定して抽出を行い、他の姿勢については、手作業で抽出した骨形状モデルを用いて MR 画像から骨領域を自動抽出する技術を開発した。これにより、多数の MR 画像データを効率よく処理できるようになった。

(3)デジタルハンドの試作

近位（根本の方）の骨で重ね合わせを行い、遠位の骨が姿勢の変化に伴ってどのように回転しているかを定量的に同定した。この結果、回転軸がねじれていることが明らかになり、このねじれ構造を定量的にモデル化することで、正確な手の運動計測を実現した。

同定した手の構造モデルをベースとして、少ない表面マーカから多自由度の手の動きを正確に計測する技術を開発した。計測した角度を、基本構造モデルに再入力して、姿勢を

再現した結果、手先位置の誤差は 2mm 以下であった。

手がシリンダー状のものを把持する等の姿勢を表現でき、機能寸法を再現できるデジタルハンド・ソフトウエアの製作を行った。これは、将来的に指先反力、変形・摩擦等のより高機能のモデルを組み込める「デジタルハンド・プラットフォーム」としてのコンピュータ・ソフトウェアになっている

本スタディで得られた成果は以下のとおりである。

①手の三次元計測器による手の形状データから、手袋等の手に関係する製品に必要な手の寸法項目を求める手法を確立した。

②100 人規模の手計測による手の詳細寸法データと三次元計測器による寸法データとの比較を行うことにより、三次元計測器による短時間で、かつ特別な技能がなくても、大規模の手の寸法データベース構築が可能であることが確認できた。

③手がシリンダー状のもの等を把持する姿勢を再現でき、機能寸法を再現でき、将来的に指先反力･摩擦・変形等の高機能なモデルを組み込み得るデジタルハンド・ソフトウエアを製作できた。

④本スタディで試作した「デジタルハンド」により、コンピュータ上に様々な手の大きさの再現を行い、把持姿勢の違いによる製品の概観形状の評価が行えるようになり、デジタルハンド技術のキーとなる技術的ブレークスルーの見通しが得られた。

デジタルハンドによる仮想設計を実現するには、計算機上に (a) 手の構造と機能、(b) 製品機能、(c) 手と製品の相互作用、(d) 手による知覚と操作性評価を再現しなければならない。本スタディは、この足掛かりとなるもので手の構造と運動機能の一部をモデル化し再現したものである。今後、

1) 手の筋骨格構造モデルの再現
2) 手と製品の間に働く操作反力分配、指先変形、摩擦の模擬
3) 手の触覚・固有感覚による知覚模擬
4) 1)～3)に基づく操作性の仮想評価

を研究し実現していく必要がある。また、実際には手先だけが単独で存在しているわけではないため、5) 全身・上肢の構造システムとの連携や姿勢評価も合わせて研究していく必要がある。

本スタディの成果（要旨）は、（社）人間生活工学研究センターのインターネットホームページ（http://www.hql.jp）から公開を行う他、産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターのデジタルヒューマン技術協議会における課題への取り込み、関連学会や業界のシンポジウム等に、積極的に報告を行うことを検討している。

おわりに

本スタディでは「デジタルハンド」の基盤をなす、手の寸法、構造、形状、姿勢のモデルとそれを可視化提示できるソフトウェアプログラムを開発した。手の寸法については、手の寸法計測を実施し、寸法データベースに基づくバウンダリーファミリーを合成した。また、並行して三次元スキャナによる手の形状計測と形状データからの寸法取得も試み、従来の手計測によって得られたバウンダリーファミリーと同等の結果が得られ、将来的に形状計測によって大量データを取得・蓄積できる可能性を示した。また、手の形状モデルについて別途 MRI で撮像した詳細表面形状データと解剖学的特徴点を有する標準手モデルを、バウンダリーファミリーとして合成された手の各部寸法に合致するように変形することで、三次元モデルとしてのバウンダリーファミリーを生成した。

さらに、この形状モデルに姿勢を与えるための内部骨格構造を、同じように MRI 画像データから骨格を抽出することによって明らかにした。骨格の抽出を効率化するために、半自動的に三次元骨モデルを医用画像ボクセル空間にマッチングして、骨の姿勢を同定する技術を新たに開発した。この技術を用いて多数枚の医用画像を処理した結果、指の骨格構造として関節回転軸が平行ではなく、指先に向かってねじれた構造であることを定量的に明らかにした。さらに、この骨格構造モデルをベースに、体表面に貼り付けたマーカから生体内関節中心の位置を精度良く推定する技術を開発した。指先位置での精度は 2mm 以下であり、デジタルカメラや携帯電話などの操作設計に必要な精度を満たしている。これによって得られた姿勢と構造を手の寸法・形状モデルとして可視化するソフトウェアプログラムを実装した。このプログラムは、将来的に指先反力、変形、摩擦や筋骨格系モデルなどをデジタルハンドに付加していくためのプラットフォームとなるもので、そのための拡張性を踏まえたデータ・クラス構造設計となっている。

このスタディの発展として、開発したデジタルハンドソフトウェアの一部を、フランス DASSAULT 社製の CAD である「CATIA」に搭載し、さまざまな IT 機器開発に活用していく計画がある。これは、文部科学省の知的クラスター創成事業の一つである「札幌 IT カロッツェリア」の一部として計画されているもので、IT 機器の基盤設計から筐体設計、ヒューマンインタフェースの操作系可視化と合わせて、人間の手による機器操作を模擬・可視化する目的で開発システムに組み込まれるものである。これは小規模ながら「デジタルモックアップ」構想の具現化に繋がる。また、データの計測とモデル化研究を担当した産業技術総合研究所デジタルヒューマン研究センターでは、これらの手のモデルを応用した製品開発の共同研究に取り組み始めている。スポーツ用具や包装品などの設計に手の構造・機能を反映し、より使いやすい機能的製品を開発するための研究である。本スタディで開発したデジタルハンドモデル及びソフトウェアは手の一部の基本機能を実現したに過

ぎないが、このような段階においても、CAD との組込計画や具体的な製品開発研究の動きがあるのは特筆すべきことである。今後、より多くの機能モデルが追加されることで、より幅広いアプリケーションへの展開が期待される。一方で、人間の機能には大きな個人差があり、あり得る人間機能モデルをコンピュータ上に再現するためには、人間機能特性のデータ蓄積が不可欠である。寸法、形状にとどまらず、医用画像、関節特性、姿勢、運動のデータを機能モデル開発の動向を見据えながら、戦略的に蓄積していく必要があろう。

－　禁無断転載　－

１６－Ｆ－５

システム開発

デジタルハンド技術の開発に関するフィージビリティスタディ報告書

－要旨－

発　行　平成１７年３月

発行者　財団法人　機械システム振興協会

〒108-0073 東京都港区三田一丁目４番28号

電　　話　　０３－３４５４－１３１１

社団法人　人間生活工学研究センター

〒541-0047 大阪市中央区淡路町三丁目３番７号

電　　話　０６－６２２１－１６６０

本報告書の内容を公表する際は、あらかじめ上記にご連絡下さい。